

LABORATORIUM VOOR TOEGEPASTE GEOLOGIE EN HYDROGEOLOGIE

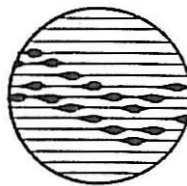
LITERATUURONDERZOEK NAAR HET GEBRUIK
VAN NATUURLIJKE KLEI EN ZANDBENTONIET
ALS AFDICHTING VAN STORTPLAATSEN
- ONTWERP VAN VERSLAG -



UNIVERSITEIT GENT

Laboratorium
voor
Toegepaste Geologie
en
Hydrogeologie

LITERATUURONDERZOEK NAAR HET
GEBRUIK VAN NATUURLIJKE
KLEI EN ZANDBENTONIET
ALS AFDICHTING VAN STORTPLAATSEN
- ONTWERP VAN VERSLAG -



Geologisch Instituut
Krijgslaan 281, S8
B-9000 Gent

tel. 09/264 46 47
fax 09/264 49 88

Opdrachtgever

OVAM

Leiding : Prof. Dr. W. DE BREUCK

Studie en verslag : Lic. I. BOLLE

Onderzoek : TGO 93034

Datum : augustus 1994

INHOUD

1. ALGEMENE INLEIDING

- 1.1. Opdracht
- 1.2. Kader van het onderzoek

2. SOORTEN BELASTING WAARAAN MINERALE AFDICHTINGEN ONDERHEVIG ZIJN.

- 2.1. Inleiding
- 2.2. Fysische belastingen
 - 2.2.1. Statische belastingen met de daardoor veroorzaakte vervormingen
 - 2.2.2. Belasting door externe oorzaken
 - 2.2.3. Andere mechanische belastingen
 - 2.2.4. Warmte en uitdroging
 - 2.2.5. Weersinvloeden
 - 2.2.6. Structuurveranderingen door hydraulische belasting
- 2.3. Chemische belastingen
 - 2.3.1. Neerslag
 - 2.3.2. Percolaat en stortgas
- 2.4. Biologische belastingen
 - 2.4.1. Planten
 - 2.4.2. Dieren
 - 2.4.3. Micro-organismen

3. NATUURLIJKE KLEIEN ALS MINERAAL AFDICHTINGSMATERIAAL

- 3.1. Eisen en beproevingsmethoden betreffende de kwaliteit van natuurlijke klei
 - 3.1.1. Monsternamen
 - 3.1.2. Fysische eisen
 - 3.1.3. Mineralogische en chemische eisen
 - 3.1.4. Andere parameters
- 3.2. Aanleg van de afdichting uit natuurlijke klei
 - 3.2.1. Voorbereidende werkzaamheden
 - 3.2.2. Aanbrengen van de klei-afdichting
 - 3.2.3. Afdekken
 - 3.2.4. Aansluitingen
 - 3.2.5. Weersomstandigheden
 - 3.2.6. Toezicht en rapportering
 - 3.2.7. Aanleg van een testzone
- 3.3. Eisen en beproevingsmethoden aangaande de nacontrole
 - 3.3.1. Algemeen
 - 3.3.2. Monsternamen
 - 3.3.3. Aantal te steken monsters
 - 3.3.4. Laboratoriumonderzoek

4. ZAND-BENTONIET MENGSELS ALS MINERAAL AFDICHTINGSMATERIAAL

- 4.1. Inleiding
- 4.2. Onderwerp, toepassingsgebied, termen en definities
- 4.3. Eisen aan de materialen, het mengsel en de gereedgekomen laag
 - 4.3.1. Granulair materiaal
 - 4.3.2. Bentoniet
 - 4.3.3. Mengwater
 - 4.3.4. Mengsel en gereedgekomen laag
- 4.4. Vooronderzoek
- 4.5. Toetsingsvak
 - 4.5.1. Uitvoering
 - 4.5.2. Controle
- 4.6. Levering van materialen
 - 4.6.1. Granulair materiaal en bentoniet
 - 4.6.2. Opslag
- 4.7. Vervaardiging van de afdichtingslaag
 - 4.7.1. Voorbereidende werkzaamheden
 - 4.7.2. Verwerkingsmethode
 - 4.7.3. Beperkingen
 - 4.7.4. Controle van de verdichting
- 4.8. Keuring en controle van materialen, mengsel en gereedgekomen laag
- 4.9. Nader onderzoek en reparatie

5. EVALUATIE VAN BESTAANDE BUITENLANDSE RICHTLIJNEN EN/OF PROTOCOLLEN

- 5.1. Nederland
- 5.2. Duitsland
- 5.3. Verenigd Koninkrijk
- 5.4. Besluit

6. SYNTHESE EN EVALUATIE

REFERENTIES

1. ALGEMENE INLEIDING

1.1. Opdracht

Met de overeenkomst van 13 december 1993 gaf de Openbare Afvalstoffenmaatschappij voor het Vlaamse Gewest (OVAM) opdracht aan het Laboratorium voor Toegepaste Geologie en Hydrogeologie (LTGH) van de Universiteit Gent om een literatuurstudie uit te voeren naar het gebruik van minerale grondstoffen bij het isoleren van afvalstorten en verontreinigde terreinen.

1.2. Kader van het onderzoek

Het onderzoek omvat het verzamelen van beschikbare informatie in verband met :

- natuurlijke grondstoffen welke in aanmerking kunnen komen voor afdichting van stortplaatsen en de karakterisatie ervan zoals natuurlijke klei en zand-bentoniet ;
- eisen en beproevingsmethoden in verband met de eigenschappen ervan om als afdichtingsmateriaal in aanmerking te komen ;
- de technologie van de bewerkingen die de kleien ondergaan vooraleer als afdichtingsmateriaal gebruikt te kunnen worden ;
- eisen en beproevingsmethoden betreffende de verwerkbaarheid ;
- de technologie van de aanbreng van de bewerkte kleien ;
- eisen en beproevingsmethoden voor de aangebrachte laag naar bijvoorbeeld mechanische eigenschappen, doorlaatbaarheid, chemische resistentie enz.

Onderhavig verslag omvat volgende hoofdstukken :

- Hoofdstuk 2 : Soorten belasting waaraan minerale afdichtingen onderhevig zijn.
- Hoofdstuk 3 : Natuurlijke kleien als minerale afdichting.
- Hoofdstuk 4 : Zand-bentoniet mengsels als minerale afdichting.
- Hoofdstuk 5 : Evaluatie van bestaande buitenlandse richtlijnen en/of protocollen
- Hoofdstuk 6 : Synthese en evaluatie

2. SOORTEN BELASTING WAARAAN MINERALE AFDICHTINGEN ONDERHEVIG ZIJN.

2.1. Inleiding

Vooraleer de eigenschappen en vereisten van minerale afdichtingen in detail te bespreken worden in het kort de mogelijke belastingen die een minerale afdichting kan ondergaan overlopen.

2.2. Fysische belastingen

2.2.1. Statische belastingen met de daardoor veroorzaakte vervormingen

2.2.1.1. Constante belasting

De afmetingen en het volume van de gebruikte materialen van de totale afdichting veroorzaken een constante belasting op de minerale afdichting. Deze belasting bestaat voornamelijk uit het eigengewicht van de afdichtingslagen, de drainagelaag, de beschermingslaag, de bewortelingslaag en eventuele infrastructuurwerken.

2.2.1.2. Wisselende belasting

Deze belasting bestaat uit :

- een hydrostatische belasting (door de percolaatwaterhoogte)
- een hydrodynamische belasting (door stromingen in de drainagelaag)
- het gestorte afval
- tussenafdeklagen
- het eindafdek
- verkeersactiviteiten (tijdens de aanleg, het storten en de afwerking)
- verticale scheidingswanden
- bouwactiviteiten tijdens de uitbating (bv. funderingen)

Zettingen in het afvallichaam kunnen in de minerale basis- en bovenafdichting spanningen veroorzaken.

2.2.2. Belasting door externe oorzaken

Hieronder verstaat men bewegingen in de ondergrond veroorzaakt door :

- tectonische krachten
- invloed van mijnbouwactiviteiten
- seismische activiteit
- bemalingen

2.2.3. Andere mechanische belastingen

Zowel tijdens de aanleg van de afdichting als tijdens werken uitgevoerd in het kader van de nabestemming (dit laatste geldt alleen voor bovenafdichtingen) kan de minerale afdichting door bouwmachines, scherpe voorwerpen, bouwstoffen, sonderingen, verdichting, graafwerken enz. belast en beschadigd worden.

2.2.4. Warmte en uitdroging

Als gevolg van warmte-ontwikkeling in het afvallichaam en/of door stortbranden kunnen fysische, chemische en biologische reacties het afdichtingssysteem beïnvloeden (= temperatuurafhankelijke agressiviteit) en de waterdoorlatendheid van de afdichting verhogen.

Volgens HECKOTTER, 1988 doet een temperatuurdaling van +20 naar +10°C van het doorstromende water de doorlatendheid van een grond met ca. 25 % afnemen. Stijgt de temperatuur tot +50°C dan verdubbelt de doorlatendheidscoëfficiënt. Oorzaak hiervan is de temperatuurafhankelijkheid van de dichtheid en de viscositeit van het water.

Bij huisvuilstorten wordt door anaërobe ontbinding met een percolaattemperatuur van 25° tot 40°C rekening gehouden. Door exotherme reacties in het afval kunnen hogere temperaturen ontstaan (tot 70°C (HECKOTTER, 1988)).

Uitdroging van de minerale afdichting kan optreden door het aanbrengen van een kunststof-folie op de afdichting waardoor het percolaat de minerale afdichting niet meer kan bevochtigen (HOLZLOHNER, 1988 ; COLLINS et al., 1988 en STEFFEN, 1990). In COLLINS et al., 1988 wordt aanbevolen om de kunststoffolie *onder* de minerale afdichting aan te brengen om uitdroging te vermijden.

2.2.5. Weersinvloeden

Verdamping veroorzaakt waterverlies in de afdichting met krimpscheuren als gevolg. Krimpscheuren verhogen de doorlatendheid van de afdichting. Afgewerkte afdichtingslagen kunnen tegen krimpscheuren beschermd worden door deze met geschikte materialen af te dekken.

Vorst kan de structuur van het afdichtingsmateriaal verstoren met verlies aan sterkte en verhoging van doorlatendheid als gevolg. Opeenvolgende vorst- en dooicycli veroorzaken een toename van de doorlatendheid. Vorstschade kan door gepaste maatregelen voorkomen worden rekening houdend met de maximale vorstindringingsdiepte die verschilt van streek tot streek.

2.2.6. Structuurveranderingen door hydraulische belasting

2.2.6.1. Colmatatie

Met colmatatie wordt het verstopping bedoeld van bodemporiën door bodemdeeltjes respectievelijk door fixatie van fijn materiaal aan het korreloppervlak. Colmatatie kan verstopping van drainagelagen veroorzaken.

2.2.6.2. Suffosie

Bij suffosie worden enkel de fijnkorrelige partikels geërodeerd zodat een grofkorrelig skelet achterblijft maar het korreelskelet tegelijk toch nog stabiel blijft. Men kan een onderscheid maken tussen uitwendige, inwendige en contactsuffosie.

Suffosie kan naast een verhoging van de doorlatendheid ook colmatatie veroorzaken.

2.2.6.3. Erosie

Onder erosie verstaat men de opname en het transport van grondpartikels als gevolg van een te grote stromingsgradiënt in de grondwaterstroming. Het geheel van het korreelskelet komt in suspensie (kwelvorming) en er is dus gevaar voor lokale instabiliteit. Een onderscheid kan gemaakt worden tussen uitwendige, inwendige en contacterosie.

2.3. Chemische belastingen

2.3.1. Neerslag

Het neerslagwater is kalkagressief door het koolzuurgehalte dat van nature voorkomt. Ook andere anorganische zuren die door de luchtverontreiniging in het neerslagwater zijn terechtgekomen maken dit laatste kalkagressief.

2.3.2. Percolaat en stortgas

De doorlatendheid van minerale afdichtingen wordt beïnvloed door chemische reacties met stoffen opgelost in het percolaat en in het stortgas. Hierna volgt een overzicht van de inwerking van chemicaliën in percolaat en stortgas op minerale afdichtingen.

2.3.2.1. Invloed van zuren en basen

Zuren ($\text{pH} < 3$) en basen ($\text{pH} > 11$) lossen kleimineralen op. In klei-afdichtingen en andere kleihoudende afdichtingensystemen worden hierdoor als het ware "kanalen" gevormd. De afdichting wordt dus meer doorlatend.

Bijzonder agressieve zuren zijn zwavelzuur (H_2SO_4) en waterstoffluoride (HF).

Montmorillonietkleien zijn zeer gevoelig aan afbraak door zuren; zand-bentoniet afdichtingen zijn weinig chemisch bestand tegen zuren en basen, hoewel dit soort afdichtingen slechts weinig smectieten bevatten (minder dan 3 tot 5 %).

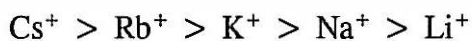
2.3.2.2. Invloed van anorganische stoffen

2.3.2.2.1. Zouten van alkali- en aardalkalimetalen

Het zwelgedrag van kleien wordt sterk beïnvloed door opgeloste elektrolyten : algemeen geldt dat de laagdikte omgekeerd evenredig varieert met de concentratie en met het kwadraat van de valentie van de ionen.

De dikste laag wordt gevormd in aanwezigheid van verdunde elektrolytoplossingen waarin monovalente natriumionen domineren.

Bij smectieten is de affiniteit voor de alkalimetaalionen als volgt :



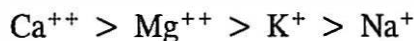
De dunste dubbellagen worden gevormd in sterk geconcentreerde elektrolytoplossingen die rijk zijn aan polyvalente kationen (bv. Ca^{++} -ionen).

Voor de aardalkalimetalen is de affiniteit als volgt :



Omzetting van een natriummontmorilloniet in een met calciumionen verzadigde vorm resulteert dus in een vermindering van de dubbellaagdikte.

In aanwezigheid van mono- en bivalente ionen worden bij voorkeur bivalente ionen aangetrokken :



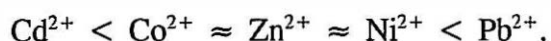
Bepalend zijn dus de concentratie van de elektrolytoplossing en de valentie van de ionen. Zo zal bijvoorbeeld natriumbentoniet bij voorkeur bivalente ionen opnemen, zelfs wanneer deze aanwezig zijn in lage concentraties. De overgang van de natriumvorm in de calciumvorm gaat gepaard met krimp, scheurvorming en toename in doorlatendheid, tenzij de afdichting een zeer sterk evenwijdig georiënteerde kleistruktuur heeft.

Calciumbentoniet zal monovalente ionen zoals natrium slechts uitwisselen wanneer zeer hoge concentraties aanwezig zijn.

2.3.2.2.2. Zouten van zware metalen

Zware metalen komen veelvuldig voor in uitlogingsvloeistoffen van afvalmateriaal ; bovendien neemt hun concentratie toe in functie van de tijd.

In een natriummontmorilloniet zullen zware metalen als volgt worden uitgewisseld :



Uitgaande van het uitwisselingsvermogen CEC kan bij benadering worden berekend hoeveel zware metalen kunnen weerhouden worden. Alvorens doorbraak van de zware metalen optreedt kan hun sorptievermogen echter in hoge mate, dit wil zeggen in een veel grotere hoeveelheid dan aangegeven door de CEC, en langdurig worden verbeterd. Membraanpotentiaalverschijnselen kunnen immers zware metalen aan één zijde van het kleimineraal onder de vorm van neerslagen weerhouden ; de hierdoor ontstane concentratiegradiënt zal dan de verdere uitwisseling en neerslag van de zware metalen bevorderen (zo kan lood bijvoorbeeld als loodsulfide rond bentoniet neerslaan).

2.3.2.3. Invloed van organische stoffen

2.3.2.3.1. Polaire organische stoffen

Algemeen geldt dat de doorlatendheid weinig verandert zolang de oplossing minstens 50% water bevat en er geen fasescheiding is tussen de organische stof en het oplosmiddel.

In het geval van geconcentreerde organische oplossingen zal :

- de doorlatendheid toenemen¹
- de toename in doorlatendheid belangrijker zijn voor afdichtingen opgebouwd uit smectieten²

Neutrale, organische stoffen zijn onder andere ethanolamine, azijnzuur, ureum, methanol, formamide, hydrazine, enz.

Heptaan en trichloorethyleen ($D = 3$) hebben de laagste diëlektrische constante.

Hoe groter de compactiegraad van de minerale afdichting is, des te groter is de chemische weerstand voor organische stoffen (afname van het poriënvolume).

2.3.2.3.2. Ionische organische stoffen

In tegenstelling tot neutrale, polaire organische molekulen die watermolekulen in de interlamellaire ruimte vervangen, wisselen ionische organische stoffen tegenionen uit. Hierdoor

¹ dit wordt als volgt verklaard :

uitgaande van het feit dat de meeste organische vloeistoffen een kleine diëlektrische constante D hebben en de dikte van de diffuse dubbele laag recht evenredig is met D volgt dat dunne diffuse dubbele lagen worden gevormd met als gevolg flocculatie, krimpen van het korrelskelet, krimpcheuren en toename in doorlatendheid.

Opmerking : uit proeven blijkt dat D van de opgeloste stoffen in een geconcentreerde oplossing kleiner moet zijn dan 30 tot 50 (D van water = 80) vooraleer de doorlatendheid toeneemt.

² dit wordt als volgt verklaard : de toename van doorlatendheid stijgt met toenemende negatieve lading van de kleimineralen. Immers, hoe belangrijker het dubbellaageffect is, hoe belangrijker de invloed op de korrelstructuur is en op de doorlatendheid.

In dit opzicht is de graad van gevoeligheid : smectiet > illiet en illiet-chloriet > kaolinit. Zandbentoniet afdichtingen worden dus intensief aangetast door geconcentreerde organische oplossingen.

veranderen de zweleigenschappen : zo kan in montmorilloniet bijvoorbeeld het alkylammoniumorganokation na uitwisseling opgenomen worden en een organofiele en hydrofobe tussenruimte vormen die de intrakristallijne zwelling in waterige milieus reduceert ; er kan dan zelfs krimp optreden.

Bij de meeste organische oplossingen zal echter sterke zwelling optreden. In aanwezigheid van sterk polaire organische stoffen is de zwelling zo sterk dat de structuur van de afdichting verloren gaat en dat de doorlatendheid toeneemt.

Kationische organische stoffen kunnen gevormd worden na afbraak van proteïnen ; ze kunnen ook rechtstreeks in het afvalmateriaal terecht komen (bv. afkomstig van wasmiddel-verzachters die bacterieel niet kunnen afgebroken worden).

2.3.2.3.3. Niet-polaire organische stoffen

Bij deze stoffen is er slechts een relatief kleine invloed. In feite treedt alléén fysische adsorptie op.

2.4. Biologische belastingen

2.4.1. Planten

Minerale afdichtingen kunnen door hogere planten doorworteld worden. Dit gebeurt niet alleen met bovenafdichtingen maar ook met slecht afgedekte basisafdichtingen.

2.4.2. Dieren

Woel- en knaagdieren kunnen de minerale afdichting beschadigen. Voldoende afdek en een geschikte afsluitende laag (grind) zijn nodig.

2.4.3. Micro-organismen

Door biochemische reacties van micro-organismen kunnen de fysische eigenschappen van de drainagelagen veranderen (bv. neerslag door ijzer- en mangaanbacteriën).

Het gehalte aan organische bestanddelen neemt door microbiologische activiteit toe in functie van de tijd.

3. NATUURLIJKE KLEIEN ALS MINERAAL AFDICHTINGSMATERIAAL

3.1. Eisen en beproevingsmethoden betreffende de kwaliteit van natuurlijke klei

3.1.1. Monstername

In de betreffende kleigroeve worden per sectie van 2,5 hectare willekeurig verdeeld over de groeve vijf boringen uitgevoerd (bv. met een Edelman-boor). Ongestoorde monsters zijn niet vereist.

Van deze boringen worden monsters genomen. Het is aan te raden om elk afzonderlijk monster samen te stellen uit vijf deelmonsters teneinde een zo representatief mogelijke monstername te bereiken.

Van elke boring dient een beschrijving gemaakt te worden zodat achteraf een relatie gelegd kan worden tussen veld- en laboratoriumwaarnemingen.

3.1.2. Fysische eisen

De voornaamste eis waaraan de basisafdichting moet voldoen is een zo gering mogelijke doorlatendheid voor water en voor percolaat.

3.1.2.1. Korrelverdeling

Het aandeel van de deeltjes $< 2\mu\text{m}$ moet groter of gelijk zijn aan 35% (ADVIESBUREAU BROUWERS, 1994). Volgens DRESCHER, 1988 dient dit aandeel minstens 20 gewichtsprocent te bedragen. Volgens ANONIEM, 1988 dient dit minimum 10% te zijn.

Minimum 90% van de minerale delen moet kleiner zijn dan $63\mu\text{m}$ (ADVIESBUREAU BROUWERS, 1994).

Het gewichtspercentage van de delen kleiner dan $75\mu\text{m}$ moet meer dan 25% bedragen (sommige auteurs vermelden een hoeveelheid van minimum 50%).

De korrelverdeling kan bepaald worden volgens de NEN 5140 norm (Nederland) of DIN 18123 norm (Duitsland).

Kleihoudende afzettingen van glaciale oorsprong zijn dikwijls grinthoudend. De aanwezigheid van een bepaalde hoeveelheid grint biedt als voordeel sterkte aan het materiaal te geven en de zwel- en krimpeigenschappen van de klei te verminderen.

De maximaal toegelaten hoeveelheid grint moet $< 50\%$ (voor $k \leq 1 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$) zijn. Deze voorwaarde is evenwel bepaald aan de hand van in het laboratorium verkregen resultaten waar homogene menging van het grint en het kleihoudend materiaal is verzekerd.

De korrelafmeting van het grint moet variëren van 25 tot 50 mm.

Tijdens de constructie van de afdichting moet zoveel mogelijk worden verhinderd dat segregatie van het grint optreedt : dit is de vorming van geïsoleerde "clusters" grintmateriaal

waarvan de holten onvoldoende of niet met kleihoudend materiaal zijn gevuld waardoor de doorlatendheid toeneemt.

3.1.2.2. Doorlatendheid

De doorlatendheidscoëfficiënt k van de gebruikte klei moet kleiner of gelijk zijn aan $1 \cdot 10^{-9}$ m/s. Bij LANDESAMT FÜR WASSER UND ABFALL NORDRHEIN-WESTFALEN, 1991 wordt een maximumwaarde van $1 \cdot 10^{-10}$ m/s opgegeven. DRESCHER, 1988 vermeldt een k -waarde van $5 \cdot 10^{-10}$ m/s.

Lekkage naar de ondergrond voor een bovenafdichting mag maximaal 20 mm/jaar bedragen (ANONIEM, 1989).

Veranderende stijghoogte

De doorlatendheid wordt het best beproefd met de "falling-head" methode (ADVIES-BUREAU BROUWERS, 1994). Bij aanvang van de proef dient de gradiënt minimaal 20 of hoger te zijn. De metingen worden voortgezet tot een gradiënt van 5 of lager is bereikt, hetgeen overeenkomt met praktijkomstandigheden. Het voordeel van deze methode is dat uit de metingen direct de relatie tussen de doorstroomsnelheid v en de potentiaalgradiënt i kan worden vastgesteld, zodat ook in geval van een niet-lineaire relatie direct bij elke willekeurige gradiënt de daarbij horende lekkage kan worden berekend. Op het traject tussen $i = 20$ en $i = 5$ dienen minstens vijf metingen te worden verricht. Op grond van ervaring dient de meting minstens drie weken te worden voortgezet.

De doorlatendheidsbepalingen dienen uitgevoerd te worden met ontlucht leidingwater. Voor klei die toegepast wordt als onderafdichting kan de doorlatendheidstest uitgevoerd worden met percolaat van een representatieve stortplaats. Dit percolaat dient vooraf gefiltreerd te worden om dichtslibbing van het monster te voorkomen zodat onevenredige positieve beïnvloeding van de beproeving wordt voorkomen.

Indien geen representatief percolaat beschikbaar is kunnen volgende testvloeistoffen worden gebruikt :

- 5 % anorganisch zuur (zoutzuur, salpeterzuur, zwavelzuur ; elk 33 vol. %) ; pH=1,0.
- 5 % organisch zuur (azijnzuur en propionzuur ; elk 50 vol. %) ; pH=2,2
- percolaat van metaalzouten (nikkelchloride, koperchloride, chroomchloride, zinkchloride; elk 1 g/l) ; pH=2,9.
- synthetisch percolaat (0,15 ml natriumacetaat ; 0,15 ml azijnzuur ; 0,05 ml glycine ; 0,007 ml salicylzuur) ; pH ongeveer 4,5.

Bij de doorlatendheidsproef wordt het monster opgebouwd met het natuurlijk watergehalte en wordt vervolgens de doorlatendheid bepaald met de doorstroomvloeistof. De steundruk die op het monster toegepast wordt tijdens de proef moet gelijk zijn aan de te verwachten belasting op de afdichting. De proef kan uitgevoerd worden zoals beschreven in paragraaf 3.6.3.3. van HOEKS et al., 1990 of pagina's 564-567 van AL-KHAFIJI et al., 1992.

Uit de doorlatendheidsmetingen van de verschillende monsters dient het geometrisch gemiddelde berekend te worden.

De waterdichtheid van de afdichtingslaag moet worden aangegeven met de te verwachten lekkage in mm/jaar. Dit betekent dat er een omrekening naar ontwerp-veldomstandigheden

moet plaatsvinden, rekening houdend met het verband tussen specifiek debiet en potentiaalgradiënt en de te verwachten gradiënten in de veldsituatie.

3.1.2.3. Plasticiteit

De consistentiegrenzen (vloiegrens w_L , uitrolgrens w_p en krimpgrens w_{krimp}) dienen bepaald te worden. De plasticiteitsindex i_p is het verschil tussen vloiegrens en uitrolgrens.

Volgende eisen worden gesteld :

- $i_p > 10 \%$ (voor $k \leq 1 \cdot 10^{-9}$ m/s)
- sommige auteurs vermelden : $i_p \geq 15 \%$

In ADVIESBUREAU BROUWERS, 1994 dient i_p minstens 35 % te bedragen.

Gronden met een hoge i_p , dit is 30 tot 40 à 45 % kunnen in principe wel worden aangewend als klei-afdichtingmateriaal, maar vereisen een zeer arbeidsintensieve verwerking (mengen, hydrateren, homogenizeren) en verdichting ; ideaal zijn gronden met een i_p tussen 10 en 30 %.

In ANONIEM, 1988 dient te klei aan volgende consistentiegrenzen te voldoen : $w_L < 90 \%$ en $i_p < 65 \%$.

Bij LANDESAMT FÜR WASSER UND ABFALL NORDRHEIN-WESTFALEN, 1991 zijn volgende criteria opgenomen : $w_L \geq 35 \%$ en de consistentie moet begrepen zijn tussen 0,75 en 1,0.

De consistentiegrenzen kunnen bepaald worden conform de Nederlandse Standaard RAW bepalingen, hoofdstuk 2, paragraaf 2, proef 15 (STICHTING CROW, 1991).

De bepaling kan ook geschieden volgens DIN 18122.

3.1.2.4. Verdichting

Talrijke studies hebben proefondervindelijk de invloed van het watergehalte op de doorlatendheid van verdicht kleimateriaal aangetoond.

3.1.2.4.1. Watergehalte w versus pakkingsdichtheid γ_d

De w - γ_d relatie geeft informatie over de optimale verdichtingsvoorwaarden van klei-af-dichtingen en van gronden in het algemeen.

Met behulp van in het laboratorium uitgevoerde verdichtingsproeven (bijvoorbeeld proc-torproeven) worden de resultaten in een grafiek uitgezet (fig. 1).

Gronden verdicht bij een watergehalte kleiner dan w_{opt} (w_{opt} = het watergehalte waarbij de maximale pakkingsdichtheid wordt verkregen) zijn meer doorlatend dan gronden verdicht bij een watergehalte $w = w_{opt}$ of bij $w > w_{opt}$. Een minimale doorlatendheidscoëfficiënt wordt meestal bereikt bij watergehalten die enkele procenten groter zijn dan w_{opt} (fig. 2).

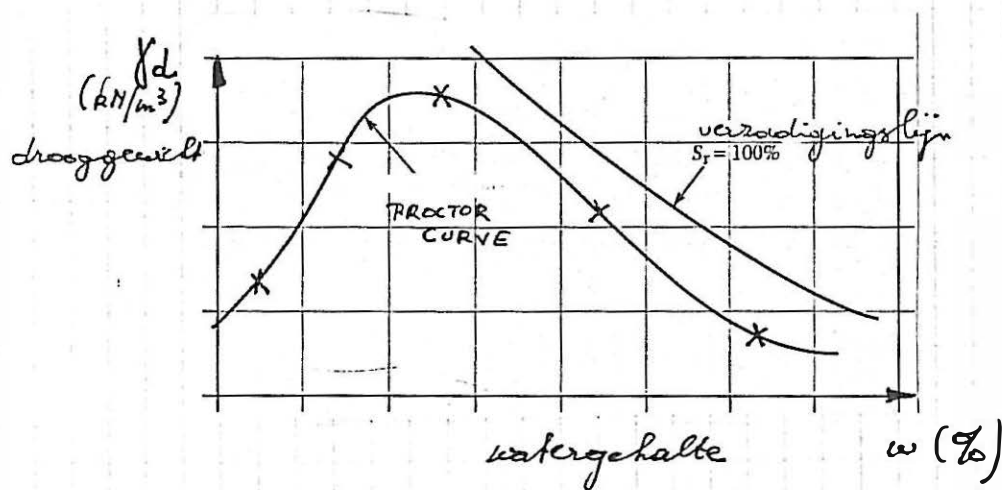


Fig. 1. Proctorcijve opgesteld aan de hand van resultaten van de proctorproef op vijf monsters (x).

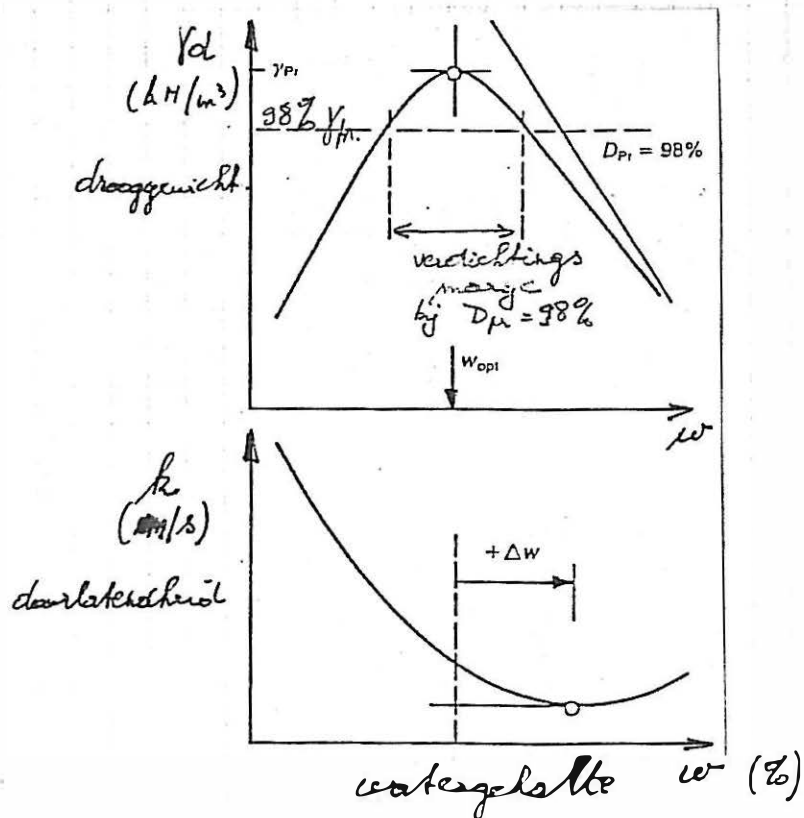


Fig. 2. Verband tussen doorlatendheid en optimaal watergehalte w_{opt}

Voor één welbepaalde verdichtingsmethode neemt de k-waarde af bij toenemende verdichtingsenergie (fig. 3)

3.1.2.4.2. In de literatuur vermelde criteria voor watergehalte w en pakkingsdichtheid (uitgedrukt als drooggewicht γ_d)

3.1.2.4.2.1. Watergehaltecriterium

Het watergehalte w_{aanmaak} van het te verdichten materiaal moet 3 tot 6 % groter zijn dan het optimale watergehalte w_{opt} , zoals verkregen na uitvoering van de gestandaardiseerde verdichtingsproef ASTM D-698.

Bij deze verdichtingsenergie zijn bovendien natte (en zachte) klei-aggregaten gemakkelijker te verkleinen en te mengen dan droge (en harde) aggregaten.

3.1.2.4.2.2. Drooggewichtcriterium

Het criterium voor de pakkingsdichtheid wordt hoofdzakelijk bepaald door de korrelverdeling van de afdichting (tabel 1).

Tabel 1. - Vereiste graad van verdichting in functie van de grondsoort.

Grondsoort waaruit de afdichting is opgebouwd	In situ vereiste graad van verdichting na uitvoering van de standaardverdichtingsproef (uitgedrukt als % van $\gamma_{d,\text{max}}$) (fig. 2)
klei	≥ 95 $\geq 90^3$ $\geq 92^4$
kleihoudende leem leemhoudende klei	≥ 97 $\geq 95^4$
onsamenhangende, meer doorlatende grond (ongelijkvormige korrelverdeling)	≥ 100

³ na uitvoering van de gewijzigde verdichtingsproef D1557

⁴ voor zones die plaatselijk moeilijk te bereiken zijn (bv. taluds).

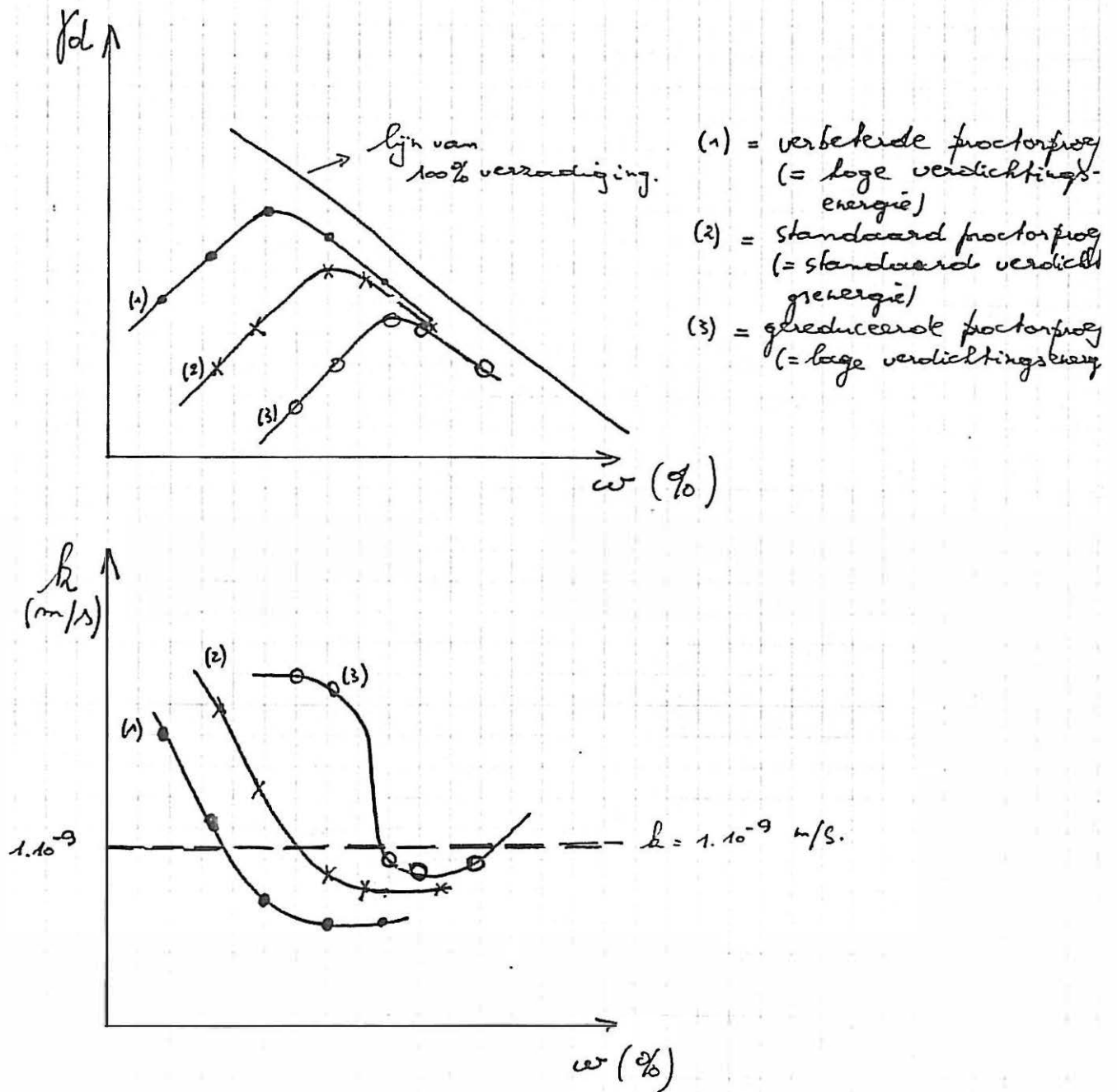


Fig. 3. Verband tussen verdichtingsenergie (= type proctorproef) en doorlatendheid k

Er dient te worden opgemerkt dat deze toegelaten w - en γ_d -waarden slechts binnen een zeer nauwe marge variëren, wat moeilijkheden oplevert tijdens de aanleg van de afdichting en ook de aanlegperiode sterk verlengt.

Daarenboven blijken natte gronden aan de eis van $\gamma_d \geq 95 \% \gamma_{d,max}$ moeilijk te kunnen voldoen (deze eis is voornamelijk van toepassing voor ontwerpen waar criteria van sterkte en geringe samendrukbaarheid, eerder dan van doorlatendheid van belang zijn).

3.1.2.4.3. Recente criteria (in functie van de doorlatendheid)

Recenter zijn criteria voor het watergehalte w ontwikkeld, rekening houdende met een vooropgestelde eis van $k \leq 1.10^{-9}$ m/s.

De bepaling van de grenzen van het toelaatbare watergehalte bij aanmaak worden hierna kort besproken.

3.1.2.4.3.1. Onderste grens van watergehalte

In het geval dat één enkele verdichtingsproef wordt uitgevoerd geldt dat $w_{aanmaak}$ 1 tot 3 % groter moet zijn dan $w_{opt,proctor}$.

3.1.2.4.3.2. Bovenste grens van het watergehalte

Deze grens wordt meestal bepaald door de niet-gedraineerde schuifweerstand c_v (c_v is functie van w_{opt} en van i_p) van de klei. Deze grens kan tevens beschouwd worden als de limiet van berijdbaarheid (afhankelijk van de aangewende verdichtingsapparatuur) (LEROUEIL et al., 1992).

3.1.2.4.4. Beproevingsmethoden

Van de vijf samengestelde monsters kan het optimale vochtgehalte voor verdichting via de proctorproef conform de Nederlandse Standaard RAW Bepalingen, hoofdstuk 2, paragraaf 2, proef 5.1. bepaald worden. De soortelijke massa en het natuurlijk vochtgehalte kan volgens proef 4 van deze Standaard bepaald worden (STICHTING CROW, 1990).

Het watergehalte kan ook bepaald worden conform NEN 5781, 5782 en 5784 of conform DIN 18121.

Het drooggewicht kan bepaald worden conform NEN 5781 of DIN 18125.

3.1.2.5. Vervormingsgraad

De aangebrachte afdichting moet zowel gelijkmatige als ongelijkmatige vervormingen kunnen opnemen zonder dat zijn eigenschappen noemenswaardig veranderen.

Wanneer de krommingsradius groter of gelijk aan 200 m is treden er geen scheuren op aan het oppervlak van de afdichtingslaag (LANDESAMT FÜR WASSER UND ABFALL NORDRHEIN-WESTFALEN, 1991).

Teneinde het vervormingsgedrag en de zwelling van de minerale afdichting te beoordelen is het aangewezen de samendrukbaarheid, het zwellingsgedrag en de schuifweerstand te bepalen. Met triaxiale en uniaxiale samendrukkingproeven en directe schuifproeven kan het spanningsvervormingsgedrag bepaald worden (LANDESAMT FÜR WASSER UND ABFALL NORDRHEIN-WESTFALEN, 1991).

Voor het uitvoeren van de vermelde proeven bestaan diverse buitenlandse normen.

3.1.3. Mineralogische en chemische eisen

3.1.3.1. Gehalte aan kleimineralen

Het gehalte aan kleimineralen dient minstens 10 gewichtsprocent te bedragen (LANDESAMT FÜR WASSER UND ABFALL NORDRHEIN-WESTFALEN, 1991).

De bepaling kan geschieden door röntgendiffractie.

3.1.3.2. Gehalte aan zwellende kleimineralen

Het gehalte aan sterk zwellende kleimineralen (dit zijn meestal mineralen uit de smectietgroep) dient volgens ADVIESBUREAU BROUWERS, 1994 minstens 5,25 % te bedragen.

De bepaling kan geschieden door middel van röntgendiffractie.

De zweleigenschappen kunnen bepaald worden via de ENSLIN-test of volgens DIN 18132.

3.1.3.3. Kationenuitwisselingscapaciteit en gehalte aan primaire kationen

In overeenstemming met de wet van de elektrische neutraliteit worden de negatieve ladingen van kleien geneutraliseerd door adsorptie van kationen die in waterig milieu hydrateren en uitwisselbaar zijn met equivalente hoeveelheden andere kationen aanwezig in de oplossing. Deze hoeveelheid kationen wordt uitgedrukt als "kationuitwisselingsvermogen" (CEC).

Naar analogie bestaat het begrip "anionuitwisselingsvermogen" (AEC) als er positieve ladingen aanwezig zijn veroorzaakt door defecten aan de randen van de plaatvormige kleimineralen (hoofdzakelijk bij kaolinit).

3.1.3.3.1 Ionenuitwisselingsvermogen van de verschillende kleimineralen

In tabel 2 worden enige waarden voor CEC en AEC vermeld (uitgedrukt als milli-equivalenten/100 g droge klei).

Tabel 2. - Enkele waarden voor de CEC en AEC van enkele kleimineralen.

	CEC (meq/100g)	AEC (meq/100g)
kaolinit	3-15	7-20
illiet	10-40	4-17
kleimineralen met gemengde lagen	10-80	-
smectiet	60-150	20-30
vermiculiet	120-200	-

Het uitwisselingsvermogen is voor elk type kleimineraal verschillend vermits de hoeveelheid elektrische ladingen per eenheidscel verschillend zijn.

De CEC- en AEC-waarden zijn ook afhankelijk van de hoeveelheid voor adsorptie beschikbare ionen en van het type ion : bij voorkeur worden bi- en polyvalente ionen met een kleine effectieve staal geadsorbeerd.

3.1.3.3.2. Ionenuitwisselingsvermogen als maat voor het vastleggingsvermogen van verontreinigingen in klei-afdichtingen

Het gedrag van kleimineralen in afdichtingen wordt voornamelijk bepaald door het uitwisselingsvermogen.

Smectieten kunnen tal van anorganische kationen uitwisselen : K^+ , Mg^{++} bijvoorbeeld worden gemakkelijk uitgewisseld en hebben vooral invloed op de zweieigenschappen. De binding voor zware metalen is sterker en uitgaande van de CEC-waarden vermeld in tabel 2 kan ruwweg berekend worden hoeveel zware metalen kunnen gebonden worden. Het metaaladsorptievermogen is immers ook nog afhankelijk van korrelgrootte, kristalmorfologie, enz.

Ook aluminium (Al^{3+}) en ijzer (Fe^{3+}) worden gebonden : de voorkeur voor kationen van trivalente zouten is groter dan voor bivalente kationen.

Bij vermiculieten worden gemakkelijker K^+ , NH_4^+ , Rb^+ of Cs^+ interlamellair gebonden.

De aanwezigheid van hydroxy-Al of hydroxy-Fe tussenlagen in vermiculieten en smectieten bevordert de opname van sommige anionen zoals fosfaten, sulfaten en boraten.

In de praktijk wordt het vastleggingsvermogen efficiënter bij aanleg van een samengestelde afdichting met verschillende combinaties van kleimineralen en indien een natuurlijke kleiformatie over grote diepte in de ondergrond aanwezig is.

De bepaling kan gebeuren met een oplossing van mono- of bivalente metaalkationen of met ammonium ionen die toegevoegd worden aan een proefmonster van de klei.

3.1.3.4. Gehalte aan vrije metaaloxiden, sulfiden, sulfaten

Wegens de reducerende omstandigheden die er heersen nabij een basisafdichting is het van belang te weten welke redoxafhankelijke bestanddelen er zich in de gebruikte klei bevinden. Hierbij zijn vooral ijzer-, mangaan- en aluminiumoxiden en -oxyhydraten van belang daar deze onder invloed van het percolaat opgelost en verplaatst kunnen worden.

Het gehalte aan vrije metaaloxiden kan bepaald worden met spectraalfotometrische methoden of met atomaire absorptie analyse. Extractie kan geschieden volgens DIN 19684, deel 6.

Het sulfiden- en sulfatenaandeel in de gebruikte klei mag niet hoger zijn dan 5 %. Onder invloed van het percolaat en micro-biologische activiteit kunnen aanwezige pyriet- en markasietmineralen omgezet worden in zwavelzuur. Door alkalichloriden kan aanwezig gips zelfs volledig oplossen.

Al deze chemische reacties kunnen een nadelige invloed hebben op de doorlatendheid.

Wanneer het totale zwavelgehalte hoger is dan 1 % kan met speciale natchemische of met spectraalanalytische methoden het aandeel aan sulfatisch gebonden zwavel (gips, anhydriet, ijzersulfaat) en sulfidisch gebonden zwavel (pyriet, markasiet) bepaald worden.

3.1.3.5. Gehalte aan organisch materiaal

Het gehalte aan organisch materiaal dient minder dan 10 % te bedragen (LANDESAMT FÜR WASSER UND ABFALL NORDRHEIN-WESTFALEN, 1991).

Enkel door directe bepaling van de organische koolstof verkrijgt men een correct beeld van het aandeel aan organisch materiaal. Daarvoor zijn speciale analysemethoden vereist (bv. DIN E 18 128).

3.1.3.6. Carbonaatgehalte

Het gehalte aan carbonaten dient minder dan 15 % te bedragen en kan bepaald worden door titrimetrie.

Er dient een onderscheid gemaakt te worden tussen calciet en dolomiet gezien hun verschil in chemische stabiliteit.

Naast titrimetrie kan ook atomaire absorptie worden aangewend. De verhouding calciet/dolomiet kan met röntgendiffractie bepaald worden.

3.1.4. Andere parameters

In OWEIS et al., 1990 wordt vermeld dat in New Jersey (USA) volgende bijkomende tests zijn vereist :

- porositeit : geeft een indicatie over de weerstand tegen suffosie
- pH
- "pinhole test" : geeft een indicatie over de erosiegevoeligheid van de klei.

3.2. Aanleg van de afdichting uit natuurlijke klei

3.2.1. Voorbereidende werkzaamheden

3.2.1.1. Eisen aan draagkracht en vervormbaarheid van de ondergrond

De ondergrond waarop de klei-afdichting wordt aangebracht dient voldoende draagkracht te bezitten. Eventueel kan zand worden aangebracht. Met een handsondeerapparaat kan dan de draagkracht worden nagegaan. Volgens ADVIESBUREAU BROUWERS, 1994 dient de draagkracht vanaf 0,1 m vanaf de bovenkant van het zandbed minimaal 1,5 N/mm² te bedragen op vlakke gedeelten en minimaal 1,0 N/mm² op hellende gedeelten.

Volgens LANDESAMT FÜR WASSER UND ABFALL NORDRHEIN-WESTFALEN, 1991 dient de ondergrond een verdichtingsgraad van $D_{pr} \geq 95\%$ te hebben.

3.2.1.2. Ontgraven en transport

Bij het ontgraven van de klei in de groeve dient men er op toe te zien dat er geen storende lagen worden opgenomen.

Het transport van de groeve naar de plaats van verwerking dient zo snel mogelijk te geschieden. Het is aangewezen dat de kleigroeve zich in de nabijheid van de stortplaats bevindt.

Opslag is niet toegestaan, tenzij dit nodig is voor het homogeniseren (zie 3.2.1.3.), dit met het oog op het behouden van het natuurlijk vochtgehalte.

3.2.1.3. Homogeniseren

Door de klei te vermalen verkrijgt men een zo homogeen mogelijke klei. Tijdens het homogeniseren kan men het vochtgehalte controleren en zo nodig optimaliseren.

De graad van homogenisatie is naast de graad van verdichting even beslissend voor de doorlatendheid (HOFFMANN et al., 1991).

3.2.2. Aanbrengen van de klei-afdichting

3.2.2.1. Onderafdichting

De totale dikte voor de kleilaag van de onderafdichting bedraagt over het algemeen tenminste 50 cm. In DRESCHER, 1988 wordt een minimumdikte van 1,5 m voorgesteld met voor afdichtingen op hellingen een minimumdikte van 1,7 m.

Een te geringe dikte (bv. 30 cm) leidt in de praktijk meestal tot hydraulische defecten.

De veranderingen in doorlatendheid, welke op lange termijn onder andere ten gevolge van chemische inwerkingen bijna steeds optreden, zijn de hoofdoorzaak waarom tegenwoordig in vele landen de dikte van onderafdichtingen varieert tussen 1 en 4 m. Uitgaande van in situ controlemetingen blijkt immers dat de veranderingen in de grondkarakteristieken van de afdichting slechts over een beperkte laagdikte optreden. Na verloop van tijd en onder min of

meer identieke lokale omstandigheden zal meestal een evenwichtstoestand ontstaan en zal de afdichting over zijn grootste dikte op een efficiënte manier blijven werken.

De klei dient in twee lagen van tenminste 25 cm elk te worden aangebracht. Iedere laag dient eerst verdicht te worden.

Uit beide lagen worden monsters genomen die op de doorlatendheidseis worden beproefd (zie 3.3).

Bij hellingen kleiner dan $1/2,5$ worden de laagjes evenwijdig aan het hellend oppervlak geplaatst ; bij hellingen steiler dan $1/2,5$ dienen de laagjes horizontaal te worden aangebracht.

Op de vlakke gedeelten dient de dikte van de kleilaag met behulp van waterpassing te worden gecontroleerd. Op hellende stukken vindt controle plaats door het verrichten van handboringen. Hierbij dienen de boorgaten na het meten weer volledig met klei opgevuld en verdicht te worden.

3.2.2.2. Bovenafdichting

De dikte van de kleilaag voor de bovenafdichting bedraagt over het algemeen tussen 25 en 40 cm en dient in het bestek te worden voorgeschreven. Indien de totale laagdikte groter is dan 30 cm, dient de klei in twee lagen van gelijke dikte aangebracht te worden. De dikte van de laag (lagen) moet tijdens de uitvoering gecontroleerd worden met handboringen.

Indien de kleilaag voor de bovenafdichting dunner is dan 40 cm, is het vereist dat de klei gehomogeniseerd is. De aannemer dient daartoe een garantie voor te leggen.

Als dikte van de bovenafdichting bestaande uit tertiaire Reuverse klei wordt 30 à 40 cm voorgesteld (Richtlijn van het VROM in TER HOEVEN, 1991).

3.2.2.3. Verdichting

De verdichting wordt uitgevoerd 1 à 3 dagen na het aanbrengen. De verdichting gebeurt het best met een zogenaamde bokkepootwals daar deze een contactdruk tot 7000 kPa ontwikkelt (AL-KHAFAJI et al., 1992)

De verdichting van de klei dient te worden gecontroleerd via de steekringmethode (zie proef 5.1 in STICHTING CROW, 1990).

Het droog volumegewicht van de monsters die genomen zijn op vlakke gedeelten dient gemiddeld 98 % van de proctordichtheid te bedragen, met een minimum van 96 % bij het voorkomend vochtgehalte.

Het droog volumegewicht van de monsters die op de hellende stukken genomen zijn moet gemiddeld 95 % van de proctordichtheid bedragen met een minimum van 92 %.

Het droog volumegewicht na verdichting dient minstens 1500 kg/m^3 te bedragen. Tijdens de uitvoering kan snel worden nagegaan of deze minimale verdichting haalbaar is door het vochtgehalte van de klei te bepalen en de bijhorende maximale verdichting van de proctorkromme af te lezen.

3.2.3. Afdekken

Zo snel mogelijk na het aanbrengen van de klei, doch uiterlijk na 18 uren dient op de klei een beschermende voorziening (bv. 30 cm zand) te worden aangebracht teneinde de klei tegen uitdroging te beschermen.

De soort toe te passen bescherming dient bestekmatig te worden beschreven en afgestemd te zijn op de klei-afdichting.

Indien een dubbele afdichting (mineraal en kunststof) wordt voorgeschreven kan de klei ook met een kunststoffolie worden afgedekt. Extra bescherming tegen uitdrogen is dan uiteraard niet noodzakelijk. De folie dient dan direct op de klei te worden aangebracht. Voor het aanbrengen van de folie-afdichting dienen de betreffende voorschriften dienaangaande gehanteerd te worden.

3.2.4. Aansluitingen

Op plaatsen waar een nieuwe klei-afdichting op een reeds aangebrachte afdichting wordt aangesloten dient tenminste de eerder aangebrachte klei over een breedte van 1 m "ver-springend" verwijderd te worden. De nieuwe klei dient zodanig aangebracht te worden dat er een goede waterdichte aansluiting wordt gerealiseerd.

Op kritieke plaatsen in de afdichtingsconstructie zoals bij aansluitingen, zandvermenging of indroging van oude klei dient een toeslag van 10 cm klei in de afdichting toegepast te worden.

3.2.5. Weersomstandigheden

Bij vorst in de grond of strenge vorst mag de klei niet worden verwerkt. Ook bij regen dient het werk te worden gestaakt en eventueel aangebrachte maar nog niet verdichte klei afgedekt te worden met een zeil om het binnentreden van een surplus aan vocht te voorkomen.

3.2.6. Toezicht en rapportering

Van alle werkzaamheden dient door de opdrachtgever of eigenaar een dagboek te worden bijgehouden. Hierin worden de verrichte werkzaamheden, de kwaliteit van de klei, de monstername en de monsternamelocaliteit, de weersomstandigheden en alle bijzonderheden aangegeven.

Om de objectiviteit van de monstername te waarborgen dient de opdrachtgever of eigenaar vooraf een monsternameplan op te stellen. Hiervan mag gedurende de uitvoering van de werkzaamheden niet worden afgeweken.

Ook de herkomst van de klei dient nauwkeurig te worden vermeld (uit welke groeve en uit welke sectie van deze groeve). Indien bepaalde vrachten door onvoldoende kwaliteit worden geweigerd dient ook hiervan in het dagboek melding gemaakt te worden.

Het dagboek dient na afloop van de werkzaamheden in copie aan de aannemer te worden bezorgd.

3.2.7 Aanleg van een testzone

3.2.7.1. Algemene opmerkingen

In het geval dat een testzone wordt aangelegd moet deze laatste uiteraard representatief zijn voor de definitieve afdichting en op dezelfde manier gebouwd worden.

De breedte van de testzone moet minstens drie maal de breedte van deze van de verdichtingsapparatuur zijn; meestal is dit meer dan 10 m. Minstens drie laagelementen moeten worden aangelegd, 20 tot 25 cm dik na verdichting.

Vervolgens worden in en tussen de laagjes geroerde en/of ongeroerde monsters ontnomen ter controle van pakingsdichtheid, watergehalte en andere fysische eigenschappen zoals korrelverdeling, consistentiegrenzen, opname van water, doorlatendheid.

Controle op de homogene verdeling van al deze parameters moet eveneens worden uitgevoerd, vooral voor wat het watergehalte en het drooggewicht betreft.

De proeven worden hetzij in situ uitgevoerd, hetzij in het laboratorium en de proefresultaten worden met de tijdens het ontwerp vooropgestelde waarden vergeleken.

3.2.7.2. Controle op de doorlatendheid

In het geval geen testzone wordt aangelegd, zal de onderstaande uitleg ook gelden voor de controle van de k-waarde tijdens en na de bouw van de definitieve afdichting (tenzij na de bouw grootschalige in situ testen worden uitgevoerd).

De doorlatendheid van de testzone wordt best bepaald met behulp van in situ testen uitgevoerd op kleine schaal, dit wil zeggen dat een volume materiaal groter dan 1 m³ wordt beproefd. Meestal geven deze niet-gestandaardiseerde proeven een beter idee over de werkelijk in situ bestaande doorlatendheid dan wanneer bepaald in het laboratorium. De proeven geven dus goede resultaten omdat een voldoende groot monstervolume doorstroomd wordt en omdat het in situ monster meer representatief is voor het afdichtingsmateriaal dan een laboratoriummonster. Een in situ monster is morfologisch representatief voor de macrostructuur (cfr. bijvoorbeeld bestaande scheuren).

De verschillende testen worden in onderhavig verslag niet beschreven ; alléén wordt vermeld dat, uitgaande van praktische ervaringen, de zogenaamde infiltratietest met dubbele ringen de beste test blijkt te zijn.

Gelet op de zeer geringe doorlatendheid van het te beproeven materiaal zijn deze testen uiteraard zeer tijdrovend en leveren ze meestal slechts resultaat op na verscheidene weken.

3.3. Eisen en beproevingsmethoden aangaande de nacontrole

3.3.1. Algemeen

Door de nacontrole kan worden vastgesteld of de klei-afdichting aan de gestelde eisen voldoet. Tijdens of na de aanleg van de klei-afdichting worden met behulp van Delftse bussen monsters genomen ten behoeve van de nacontrole van de afdichting. Deze nacontrole geeft ten eerste inzicht of de ingebouwde klei overeenstemt met de in het vooronderzoek bestudeerde klei.

De microstructuur van de aangelegde afdichting kan met behulp van licht- en rasterelektronenmicroscopie worden bestudeerd (KOMODROMOS et al., 1989).

De monsters dienen door een onafhankelijk en door het bevoegd gezag goed te keuren instituut onderzocht.

3.3.2. Monstername

Bij elke afdichting dient per hectare voldoende klei te worden afgegraven om een korrelverdeling en een proctorkromme te kunnen vervaardigen.

Per monsternamepunt worden twee kleikernen gestoken met een lengte van ca. 15 cm. De maximaal toelaatbare verpropping tijdens de monstername bedraagt 1 cm. Voor deze monstername kan bijvoorbeeld gebruik gemaakt worden van dunwandige stalen bussen met diameter 66 mm, de zogenaamde "Delftse bussen". Steekringen met afwijkende diameters liggend tussen 63 en 100 mm zijn toegestaan.

Na de monstername worden de bussen aan beide zijden afgesloten met een goed passende dop waarvan de bovenzijde genummerd is. Vervolgens worden de bussen zo snel mogelijk schokvrij naar het laboratorium gebracht. De bussen dienen koel bewaard te worden.

3.3.3. Aantal te steken monsters

3.3.3.1. Onderafdichting

Als minimum aantal te steken monsters per onderafdichting wordt 10 per hectare gehanteerd. Dit aantal dient gelijkelijk over de onder- (5 stuks) en bovenlaag (5 stuks) verdeeld te worden. Ook in eventuele taluds dienen monsters genomen te worden.

Voor een klei-onderafdichting met een oppervlakte groter dan 1 hectare wordt het minimum monsteraantal verhoogd met 2 per 2000 m² ingebouwde afdichting (afrondding naar boven).

3.3.3.2. Bovenafdichting

Als minimum aantal te steken monsters per bovenafdichting wordt 10 per hectare gehanteerd.

Voor een klei-bovenafdichting met een oppervlakte groter dan 1 hectare wordt het minimum monsteraantal verhoogd met 1 per 1000 m² ingebouwde afdichting (afrondding naar boven).

3.3.3.3. Afwerking monsternamepunten

De gaten waar de bussen gestoken zijn of klei ontgraven is, dienen daarna met ruim voldoende klei te worden aangevuld en zorgvuldig met de trilwals aangetrild zodat een goede aansluiting met de overige klei wordt gewaarborgd.

3.3.4. Laboratoriumonderzoek

3.3.4.1. Doorlatendheidsproef

Door een doorlatendheidsproef dient aangetoond te worden dat de afdichting een voldoende resultaat behaalt inzake de ondoorlatendheid.

Indien uit het vooronderzoek is gebleken dat er een verband bestaat tussen de permeabiliteitscoëfficiënt (k -waarde) en de gradiënt (i), dient de waterdoorlatendheid van de gereedgekomen laag te worden bepaald met de "falling head" methode, gebaseerd op de proef beschreven in paragraaf 3.6.3. van HOEKS et al., 1990. Voor iedere gradiënt kan zo de bijbehorende waterdoorlatendheid van de klei bepaald worden.

Wanneer in het vooronderzoek geen significante relatie gevonden wordt tussen de k -waarde en de gradiënt, en de waterdoorlatendheid dus beschreven kan worden met de wet van Darcy, kan de waterdoorlatendheid van de gereedgekomen laag bepaald worden met de "constant head" methode, vergelijkbaar met de methode zoals beschreven in paragraaf 3.6.3. van reeds vernoemde studie.

Kleine wijzigingen in de proefopstelling ten opzichte van de genoemde beproevingsmethoden zoals een andere diameter of dikte van het monster zijn toegestaan.

Controle van de doorlaatbaarheid tijdens en onmiddellijk na de aanleg kan ook gebeuren met isotopen-sonden (KNUPFER, 1988). Deze methode neemt minder tijd in beslag dan laboratoriumtesten zodat meer punten van de afdichting kunnen gecontroleerd worden.

Om de doorlatendheid te testen kunnen naast laboratoriumproeven ook proeven *in situ* worden uitgevoerd. In LAFFITE, 1986 worden drie experimentele toestellen beschreven waarmee kleine tot zeer kleine doorlatendheden kunnen worden gemeten.

3.3.4.2. Visuele beoordeling

Na de doorlatendheidsproef dienen de monsters visueel beoordeeld te worden op het voorkomen van zandlaagjes of zandstukken. Afwijkende monsters dienen bewaard te worden voor een eventuele korrelverdeling.

3.3.4.3. Dichtheden, korrelverdeling en proctorkromme

Per afdichting wordt van één monster een korrelverdeling en een proctorkromme vervaardigd.

Van de overige monsters wordt het droog volumegewicht en het watergehalte (voor en na de doorlatendheidsproef) getoetst aan de eerder bepaalde proctorkromme. Aan de hand van deze

gegevens dient aangetoond te worden dat de bereikte verdichting gemiddeld meer dan 98 % cq. 95 % (zie 3.2.2.3) bij het oorspronkelijke vochtgehalte is geweest met inachtnahme van de gestelde minima van 96 % cq. 92 %.

3.3.4.4. Efficiëntie van de klei-afdichting

Door een jaarlijkse analyse van de meest mobiele componenten (chloriden, sulfaten, stikstof e.a.) in het grondwater uit peilputten in de omgeving van de stortplaats kan nagegaan worden of de afdichting zijn functie vervuld (KONING et al., 1993).

4. ZAND-BENTONIET MENGSELS ALS MINERAAL AFDICHTINGSMATERIAAL

4.1. Inleiding

In Nederland werd door de Stichting Civieltechnisch Centrum Uitvoering Research en Regelgeving (CUR) in december 1993 een aanbeveling gepubliceerd omtrent granulaire afdichtingslagen op basis van zandbentoniet.

Deze CUR-Aanbeveling geeft richtlijnen voor de beoordeling van de kwaliteit van een granulaire afdichtingslaag met zandbentoniet, geeft eisen voor de in de granulaire afdichtingslaag te verwerken materialen en omschrijft het vooronderzoek en de mengselkeuze.

De inhoud van de aanbeveling is gebaseerd op praktijkervaring en op basis hiervan gehanteerde uitgangspunten. Informatie over de keuze van bepaalde eisen en beproevingsmethoden is opgenomen in een afzonderlijk rapport dat de achtergronden toelicht van de aanbeveling. Uit dit achtergrondrapport blijkt ook dat er over een aantal aspecten van het gebruik van en proeven op zandbentoniet nog onduidelijkheden bestaan.

Zo dienen volgende aspecten nader onderzocht te worden :

- invloed van het gehalte aan calciumcarbonaat en organisch materiaal van het granulair materiaal op de waterdoorlatendheid van het mengsel met bentoniet.
- onderzoek naar een betrouwbare proef om het montmorillonietgehalte in bentoniet te bepalen
- onderzoek naar een methode om het vervormingsgedrag van zandbentoniet in relatie tot het bentonietgehalte te bepalen.
- onderzoek naar de diverse mengprocessen
- ontwikkeling van snellere methoden om de waterdoorlatendheid te bepalen.
- onderzoek naar de reproduceerbaarheid van een k-waarde bepaling
- invloed van het percolaat op zandbentoniet afdichtingen (= chemische resistentie van het zandbentonietmengsel).

Gezien de uitvoerigheid en de volledigheid van de CUR-Aanbeveling 33 leek het aangewezen in de hiernavolgende paragrafen de opbouw van dit rapport grotendeels over te nemen en de opgenomen punten kort samen te vatten.

4.2. Onderwerp, toepassingsgebied, termen en definities

De aanbeveling geeft definities, eisen en richtlijnen voor de vervaardiging en kwaliteitscontrole van granulaire afdichtingslagen op basis van zandbentoniet.

De aanbeveling maakt het mogelijk om te komen tot standaard afspraken waarop de kwaliteitscontrole moet plaatsvinden.

De aanbeveling is van toepassing op granulaire afdichtingslagen op basis van zandbentoniet die horizontaal of op een talud van ten hoogste 1:1,5 worden toegepast.

In het punt "Termen en definities" van de aanbeveling worden 11 termen kort gedefinieerd.

4.3. Eisen aan de materialen, het mengsel en de gereedgekomen laag

4.3.1. Granulair materiaal

In de aanbeveling worden aan het granulair materiaal 10 eisen gesteld. Deze eisen zijn :

- afwezigheid van vreemde bestanddelen (wortels, leem)
- minerale delen $\leq 63 \mu\text{m}$ (= leem) : maximum 10,0 %
- korrelgrootteverdeling : minerale delen op zeef C8 (= stenen) : maximum 0,5 %. Als de afdichting in combinatie met een folie wordt uitgevoerd mag het gehalte aan korrels op de zeef 2,8 mm (= korrels $> 3 \text{ mm}$) maximum 0,5 % bedragen.

Bovenstaande eisen houden verband met de verwerkbaarheid en het mengproces (niet teveel leemhoudende bestanddelen) ; de beheersbaarheid van het proces (geen stenen) en het beschadigen van een eventuele folie (geen korrels $> 3 \text{ mm}$).

Het is van belang na te gaan of de korrelopbouw van het granulair materiaal tijdens de uitvoering nog ongeveer gelijk is aan de korrelopbouw van het granulair materiaal dat gebruikt is bij het vooronderzoek.

- vochtgehalte : maximum 8 % ten opzichte van de droge massa. Een te hoog vochtgehalte kan het mengproces beïnvloeden en klonten veroorzaken
- geleidingsvermogen : maximum $1000 \mu\text{S/cm}$ (maat voor het gehalte aan oplosbare zouten)
- zuurtegraad : $4,5 < \text{pH} < 9,0$ (de pH is afhankelijk van het gehalte aan kalk en humus)
- chloridegehalte : maximum 600 mg/kg (chloride-ionen zijn van invloed op de werking van bentoniet)
- organisch materiaal : maximum 3 %. De criteria voor deze parameter lopen nogal uiteen. In Duitsland wordt voor fijn verdeeld organisch materiaal zelfs een maximale waarde van 15 % aangehouden. Verder onderzoek naar de invloed van het organisch materiaal op de afdichting blijkt noodzakelijk.
- gehalte aan calciumcarbonaat : maximum 5 %. Ook hier lopen de criteria uiteen. In Duitsland wordt een gehalte aangehouden van maximaal 30 % en wordt het gehalte afhankelijk gesteld van de eigenschappen van het percolaat (HANDZIK, 1989). In de literatuur zijn voor zover bekend geen onderzoeksresultaten gerapporteerd die de invloed van het gehalte aan calciumcarbonaat op de doorlatendheid van zandbentoniet kwantificeren (CIVIELTECHNISCH CENTRUM UITVOERING RESEARCH EN REGELGEVING, 1994).
- overige eisen : het percentage minerale delen op de zeef 2 mm en de uniformiteitscoëfficiënt dienen te worden vastgesteld. Aan beide parameters worden echter geen eisen verbonden.

4.3.2. Bentoniet

4.3.2.1. Algemeen

De eisen die aan de bentoniet worden gesteld hebben meestal betrekking op het zwellend vermogen ervan. Bepalend hiervoor zijn het gehalte aan montmorilloniet en het type montmorilloniet.

Er worden geen eisen gesteld aan de chemische samenstelling van de bentoniet daar deze in de praktijk sterk varieert en geen uitsluitel geeft over de mineralogische samenstelling (gehalte aan en type montmorilloniet).

In de CUR-Aanbeveling worden vijf eisen aan het gebruikte bentoniet gesteld. Deze zijn :

- het gehalte aan montmorilloniet moet minstens 70 % bedragen. De bepaling gebeurt door röntgendiffractie éénmaal per 5000 ton bentoniet.
- het vochtgehalte mag ten hoogste 13 % ten opzichte van de droge massa bedragen. Het vochtgehalte kan uit de methyleenblauw-waarde worden berekend of uit de Enslin-proef.
- de methyleenblauw-waarde moet ten minste 250 mgMB per gram bentoniet bedragen. De bepaling gebeurt door de methyleenblauw-test.

Methyleenblauw testen uitgevoerd op mengsels granulair materiaal/bentoniet wijzen op een goede lineaire correlatie tussen het bentonietgehalte en het volume van de methyleenblauw oplossing (COWLAND et al., 1991).

- het waterabsorptievermogen moet na 24 uur ten minste 700 % bedragen. Het waterabsorptievermogen wordt bepaald met het apparaat van Enslin.
- maalfijnheid : het gehalte aan deeltjes op de zeef 125 μm mag hoogstens 5,0 % bedragen. Het verwerken van een grover gemalen bentoniet kan leiden tot een hogere doorlatendheid en een geringere mengkwaliteit.

In de praktijk wordt geactiveerde calciumbentoniet, dit is een met behulp van soda (Na_2CO_3) in natriumbentoniet omgezette calciumbentoniet het meest toegepast. Ook natuurlijke natriumbentoniet is geschikt. Calciumbentoniet wordt vanwege het geringere zwelvermogen in het algemeen niet toegepast.

Europese bentoniet is meestal natuurlijke calciummontmorilloniet die omgezet is tot natriummontmorilloniet.

Amerikaanse bentoniet is meestal de natuurlijke natriummontmorilloniet.

Het is belangrijk de eigenschappen van het gebruikte bentoniet zo goed mogelijk te kennen. Verschillende soorten bentoniet hebben veelal uiteenlopende eigenschappen (COWLAND et al., 1991).

4.3.3. Mengwater

De chemische eigenschappen van het mengwater bepalen de geschiktheid voor het gebruik met bentoniet. Het mengwater mag het zwellend vermogen van de bentoniet niet aantasten. Dit wordt gecontroleerd door de waterabsorptie van bentoniet te bepalen waarbij in de plaats van het gebruikelijke gedistilleerd water mengwater wordt gebruikt (na 24 h moet de waterabsorptie minstens 600 % bedragen).

Verder worden eisen gesteld aan :

- het geleidingsvermogen (max. 1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$)
- de zuurtegraad ($5,0 \leq \text{pH} \leq 9,0$)
- het chloridegehalte (max. 600 mg/l)

Indien leidingwater als mengwater wordt gebruikt vervallen bovenstaande eisen.

4.3.4. Mengsel en gereedgekomen laag

De samenstelling van het mengsel dient te worden vastgelegd door het uitvoeren van een vooronderzoek. Dit vooronderzoek dient te gebeuren op voor het toekomstige werk representatieve monsters. De uiteindelijke geschiktheid van het mengsel volgt uit het aanleggen van een toetsingsvak.

De eisen waaraan de gereedgekomen laag granulaire afdichtingslaag moet voldoen, moeten vooraf worden overeengekomen. In het bijzonder geldt dit voor de te realiseren k-waarde. De te realiseren verdichtingsgraad volgt uit het toetsingsvak.

4.4. Vooronderzoek

Volgende waarden dienen bepaald :

- minimaal benodigd bentonietgehalte. Dit wordt bepaald met een doorlatendheidsproef volgens de "constant head" methode uitgaande van een k-waarde van ten hoogste $1 \cdot 10^{-10}$ m/s, gemeten bij een verhang van 15.

Met een bentoniettoevoeging van ca. 5 à 7% kan meestal een doorlatendheid van $1 \cdot 10^{-9}$ m/s bereikt worden, mits de bentoniet van goede kwaliteit is (COWLAND et al., 1991).

Bij een bovenafdicthting geldt een k-waarde van $1 \cdot 10^{-10}$. Daartoe moet het mengsel bestaan uit 8% bentoniet en ongeveer 11% water (MOLENAAR, 1993b). Voor de onderafdicthting is een k-waarde van $2,3 \cdot 10^{-10}$ vereist. Dat leidt tot 7% bentoniet en ongeveer 11% water (MOLENAAR, 1993b). De hoeveelheid water is erg belangrijk. Als er teveel wordt gebruikt wordt het mengsel papperig en kan het niet meer verwerkt worden. De korrelverdeling van het gebruikte zand is ook bepalend voor het mengsel (MOLENAAR, 1993a).

- gehalte aan bentoniet. Dit is het minimaal benodigd bentonietgehalte verhoogd met minstens 1,5 %.

- effect van het percolaat. De k-waarde dient bepaald te worden met het percolaat als doorstroomvloeistof. Afhankelijk van de gevonden k-waarde dient het bentonietgehalte verhoogd te worden met 1 tot 2 %. Indien een k-waarde gemeten wordt die groter is dan $10 \cdot 10^{-10}$ m/s wordt het mengsel als niet geschikt beschouwd.

Doorlatendheidstesten op het mengsel uitgevoerd met water en met percolaat vertonen volgens COWLAND et al., 1991 echter geen noemenswaardige verschillen.

4.5. Toetsingsvak

4.5.1. Uitvoering

De uitvoering van een toetsingsvak moet worden geregeld in de overeenkomst tussen opdrachtgever en het uitvoerend bedrijf (aannemer). De ligging van het toetsingsvak moet representatief zijn voor de omstandigheden op het werk. Het oppervlak moet ten minste 250 m² bedragen per te toetsen methode. Bij de aanleg van het toetsingsvak moeten volgende aspecten worden vastgelegd :

- de verdichtingsmethode in relatie tot het te verwerken mengsel
- het verdichtingsmaterieel
- het aantal verdichtingsgangen
- de snelheid van de verdichtingsapparatuur
- dikteverhouding van de onverdichte en verdichte laag
- de mengtechniek en -kwaliteit
- weersinvloeden
- eigenschappen van de gerealiseerde laag (dikte, verdichtingsgraad en waterdoorlatendheid)
- kwaliteit van de onderbouw.

In de praktijk wordt een toetsingsvak kort voor de uitvoering van het eigenlijke werk aangelegd of vormt het de eerste stap van de eigenlijke uitvoering. De tijd ontbreekt dan om de resultaten van het onderzoek naar de waterdoorlatendheid af te wachten zodat kan worden nagegaan of het toetsingsvak aan de ontwerpcriteria voldoet. Het uitvoeren van uitgebreide proeven op het toetsingsvak lijkt dan weinig zinvol. Controle van de aangebrachte laag op waterdoorlatendheid is dan vereist. Deze controle achteraf heeft als risico dat pas na verloop van tijd wordt geconstateerd dat niet aan de eis van de waterdoorlatendheid wordt voldaan.

4.5.2. Controle

Onmiddellijk na het vermengen moet de mengkwaliteit worden bepaald door het bepalen van het bentonietgehalte met behulp van de methyleenblauw-methode. De bepaling moet ten minste tweemaal worden uitgevoerd op een lading die verkregen is met de geoptimaliseerde mengtechniek.

Op het gedeelte van het aangelegde toetsingsvak dat als meest optimaal naar voren is gekomen, moeten op twaalf aselekt gekozen plaatsen worden bepaald :

- de laagdikte
- de verdichtingsgraad
- de waterdoorlatendheid

4.5.2.1. Laagdikte

Voor en na het verdichten van de granulaire afdichtingslaag moet op iedere plaats de laagdikte worden gecontroleerd volgens de procedure beschreven in proef F van bijlage 3 in CIVIELTECHNISCH CENTRUM UITVOERING RESEARCH EN REGELGEVING, 1993.

Voor de dikte van de laag zijn in de CUR-Aanbeveling geen waarden opgenomen. Uit de beschikbare literatuur werden hiernavolgende waarden overgenomen :

- dikte als bovenafdichting : 25 cm (Richtlijn van het VROM in TER HOEVEN, 1991 en CUR, 1994).
- voorbeeld stortplaats "Meersteeg" in Geldermalsen : dikte zandbentoniet is 20 cm voor de bovenafdichting. Voor de onderafdichting is de dikte 30 cm (MOLENAAR, 1993a).
- stortplaats "VBM" te Rotterdam : dikte zandbentoniet is 25 cm voor de onderafdichting (MOLENAAR, 1993b). Op te merken valt dat het hier een combinatie van folie en zandbentoniet betreft.

In OWEIS et al., 1990 wordt een dikte van minimum 30 cm. aangegeven.

De optimale dikte van de afdichting is 30 cm., geplaatst in twee lagen. Verschillende banen van één laag dienen elkaar te overlappen (COWLAND et al., 1991).

4.5.2.2. Verdichtingsgraad

Voor de controle van de verdichtingsgraad moet op ieder plaats de droge dichtheid in situ worden bepaald door middel van de steekringmethode volgens proef 4.4. van STICHTING CROW, 1990.

4.5.2.3. Waterdoorlatendheid

Voor de controle van de waterdoorlatendheid moeten op twaalf aselekt gekozen plaatsen met behulp van een steekring ongeroerde monsters worden genomen. In de directe nabijheid van ieder steekringmonster moet een monster worden genomen voor het bepalen van het bentonietgehalte.

De doorlatendheid van een zandbentoniet mengsel kan ook met lysimeterproeven worden nagegaan (HOEKS et al., 1981). Met een mengsel met 12 gew. % bentoniet meet men in een lysimeter een k-waarde van $3,5 \cdot 10^{-10}$ m/s. Voor een mengsel met 16 gew. % bekomt men $2,3 \cdot 10^{-10}$ m/s (HOEKS et al., 1981).

De controle van de doorlaatbaarheid kan ook gebeuren met een isotopen-sonde (KNUPFER, 1988). Deze methode neemt minder tijd in beslag dan laboratoriumtesten zodat meer punten van de afdichting kunnen gecontroleerd worden.

4.6. Levering van materialen

4.6.1. Granulair materiaal en bentoniet

De levering van een partij granulair materiaal moet vergezeld gaan van een bewijs van oorsprong, afgegeven door de producent. De aard en herkomst van het materiaal moeten vermeld worden.

Na aflevering moeten de korrelopbouw, het vochtgehalte en de chemische eigenschappen op de werf worden gecontroleerd.

De levering van het bentoniet moet geschieden op basis van een koopovereenkomst waarin ondermeer een verklaring wordt opgenomen dat het geleverde goed voldoet aan de eisen die hoger werden vermeld.

Op de werf kunnen alleen steekproefgewijze de methyleenblauw-waarde, het vochtgehalte en het percentage op de zeef 125 μm worden gecontroleerd. Alle andere eigenschappen dienen door de leverancier te worden gegarandeerd.

4.6.2. Opslag

Het granulair materiaal en het mengsel moeten, indien deze in depot worden bewaard, zodanig worden opgeslagen dat vermenging met de ondergrond wordt voorkomen.

Het gereedgekomen mengsel moet zo worden opgeslagen dat inregenen of uitdroging worden voorkomen en mag ten hoogste vier weken in depot worden bewaard.

Speciale aandacht moet worden geschonken aan de buitenste laag.

4.7. Vervaardiging van de afdichtingslaag

4.7.1. Voorbereidende werkzaamheden

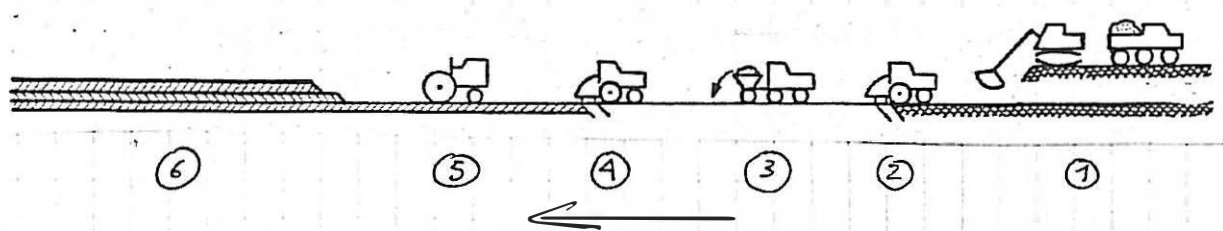
Bijzondere aandacht dient geschonken te worden aan de draagkracht van de onderliggende laag of lagen. Desnoods dient de draagkracht ervan verbeterd te worden.

4.7.2. Verwerkingsmethode

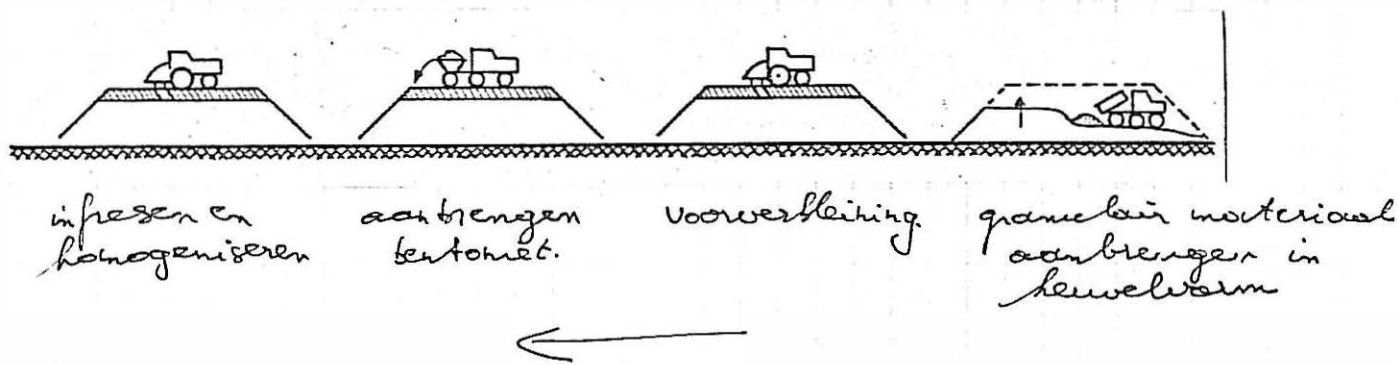
De afdichtingslaag kan zowel "mixed in place/depot" als "mixed in plant" worden uitgevoerd (REUTER, 1990 en STEFFEN, 1990). Indien een toetsingsvak werd aangelegd moet de verwerkingsmethode zoveel mogelijk zijn afgestemd op de resultaten en ervaringen die hierbij zijn verkregen, tenzij het gewenst is hiervan af te wijken.

4.7.2.1. Mixed in place/mixed in depot (fig. 4)

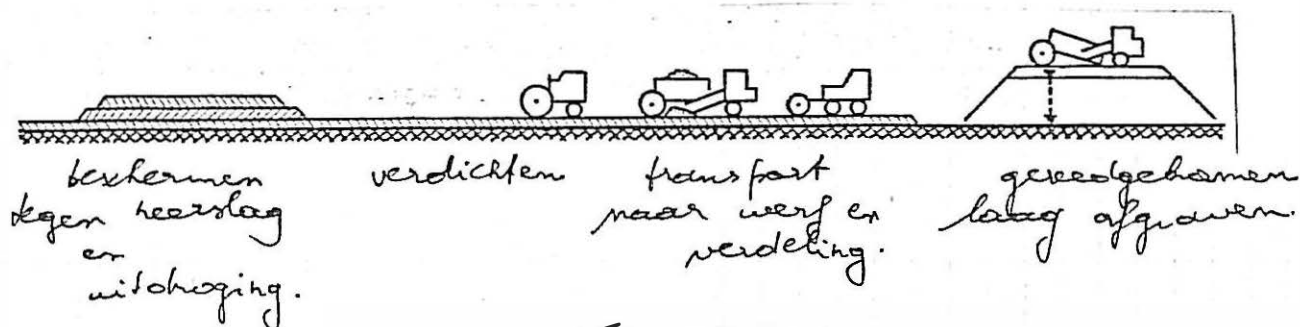
De bentoniet moet op de laag granulair materiaal worden gebracht in de hoeveelheid vastgesteld in punt 4.4. Vervolgens dient de bentoniet over de benodigde diepte door het granulair materiaal te worden gefreesd. Indien het vochtgehalte van het mengsel laag is, moet tussen twee freesgangen het nodige mengwater worden toegevoegd. Het vochtgehalte moet op 2 % onder het optimale vochtgehalte worden ingesteld. In COWLAND et al., 1991 wordt echter aangegeven dat het mengsel moet worden aangebracht bij een watergehalte gelegen tussen het optimum en +4 %. Het frezen moet bij een niet te hoge rijsnelheid plaatsvinden. Na het



- 1: breng granulair materiaal. Voorbereiding ondergrond en aan-
 - 2: voorverbleining granulaire materiaal.
 - 3: uitstrooien bentoniet
 - 4: infesen en homogeniseren
 - 5: verdichten
 - 6: beschermen tegen neerslag en uitdroging.
- (Fig. 4) "Mixed in place" mengmethode



infesen en homogeniseren aanbrengen bentoniet. voorverbleining. granulaire materiaal aanbrengen in kevelvorm



beschermen tegen neerslag en uitdroging. verdichten transport naar werf en verdeling. gereedgemaakt laag afgraven.

(Fig. 5) "Mixed in plant" mengmethode

frezen moet de laag zo snel mogelijk worden verdicht of in depot worden gebracht daar deze methode gevoelig is voor de weersomstandigheden.

De mengvolgorde en snelheid van de frees zijn van belang voor het mengresultaat.

Het zandbentonietmengsel op taluds kan verdicht worden met een trilplaat aan de arm van een hydraulische graafmachine (MOLENAAR, 1993b).

Verdichting op het vlakke kan gebeuren met de klassieke uitrusting (bv. bokkepootwalsen, gladmantelwalsen enz.) (AL-KHAFIJI, 1992). Bij voorkeur wordt het walsen gecombineerd met trillen (REUTER, 1990).

4.7.2.2. Mixed in plant (fig. 5)

Het voordeel bij de mixed in plant methode is dat het mengsel granulair materiaal - bentoniet nauwkeurig kan samengesteld worden en zonodig aangepast. Ook is een materiaalcontrole net voor het transport en inbouw nog mogelijk. Verder wordt de aanlegperiode ingekort gezien de homogeniteit en het watergehalte niet meer aangepast hoeven te worden (HEIN-RICHSBAUER, 1989).

De menging zand en bentoniet kan ter plaatse gebeuren met een mobiele menginstallatie (voorbeeld stortplaats "Meersteeg" in Geldermalsen) (MOLENAAR, 1993a).

Terreinproeven in Hong-Kong wezen uit dat de beste resultaten bekomen worden door het bentoniet eerst grondig te mengen met het gedroogde en gezeefde granulair materiaal en dan het water toe te voegen. Wanneer eerst water en dan bentoniet wordt toegevoegd worden er klonters gevormd (COWLAND et al., 1991). Optimale resultaten worden verkregen door het mengsel computergestuurd te bereiden in een kleimolen (COWLAND et al., 1991).

Het vochtgehalte van het mengsel moet worden ingesteld op 2 % onder het optimale vochtgehalte (zie echter opmerking bij 4.7.2. Beneden het optimaal watergehalte +2 % worden de afdichtingslagen broos en onderhevig aan krimp-scheuren ; boven het optimaal watergehalte +4 % worden de afdichtingslagen te zacht (COWLAND et al., 1991)). Het mengsel moet op een zodanige wijze in het werk worden gebracht dat geen vermenging met de onderliggende laag optreedt. Nadat het mengsel in het werk is gebracht, moet de laag direct worden geprofileerd en verdicht om verandering in verdichtingseigenschappen door uitdrogen (verdamping) of inregenen te voorkomen.

De verdichtingsgraad is sterk afhankelijk van het watergehalte van het mengsel.

Tijdens de aanmaak en het aanbrengen van het afdichtend mengsel dient men zorgvuldig en regelmatig het optimaal watergehalte te bepalen. Dit om het mengsel te kunnen verdichten bij het correcte watergehalte (COWLAND et al., 1991).

Het mengsel kan worden aangebracht in lagen van 20 cm dik en dan gecompacteerd (OWEIS, 1990).

Om schade zoals scheurvorming te voorkomen, moet de gereedgekomen laag na verdichten zo snel mogelijk worden beschermd tegen uitdrogen, bijvoorbeeld door middel van folie,

doek of drainage. De gereedgekomen laag kan ook bedekt worden met ca. 40 cm. zand dat nadien verwijderd kan worden (COWLAND et al., 1991).

4.7.3. Beperkingen

Een mengsel dat door uitdrogen of inregenen onvoldoende kan worden verdicht moet worden verwijderd. Verpapt materiaal mag niet worden verwerkt.

Gedurende perioden van vorst, of zolang het mengsel in depot bevroren is, mag het mengsel niet worden verwerkt.

Bij kans op neerslag moet een besluit worden genomen over de voortgang van de werkzaamheden. In principe mag bij neerslag geen nieuw materiaal in het werk worden gebracht. Reeds aangebracht maar nog niet verdicht materiaal, moet zo snel mogelijk worden verdicht.

4.7.4. Controle van de verdichting

De graad van verdichting kan eventueel bepaald worden door het doorlopend meten van de omega-waarde met een Bomag terrameter tijdens het verdichten (FINSTERWALDER, 1990). Deze meting is gebaseerd op de wisselwerking tussen de versnelling van de trilband en de dynamische stijfheid van de bodem, die met een toenemende verdichting eveneens toeneemt. Hoe hoger de verdichting, des te groter wordt de versnelling van de band. Het meetsysteem neemt deze versnelling waar en berekent daaruit de omegawaarde. Dit is een maatstaf voor de verdichting en kan waarden tussen 0 en 1000 aannemen. Hoe hoger de omegawaarde, des te beter is de ronde verdichting (FINSTERWALDER, 1990).

De verdichtingscontrole kan ook gebeuren met de zand-konus methode, de rubberballon methode of met een nucleaire sonde (AL-KHAFI, 1992).

4.8. Keuring en controle van materialen, mengsel en gereedgekomen laag

Alle proeven nodig om de gebruikte materialen, het mengsel en de gereedgekomen laag te testen op de eisen vermeld in punten 4.3 tot en met 4.7 zijn nauwkeurig beschreven in CIVIELTECHNISCH CENTRUM UITVOERING RESEARCH EN REGELGEVING, 1993.

4.9. Nader onderzoek en reparatie

In CIVIELTECHNISCH CENTRUM UITVOERING RESEARCH EN REGELGEVING, 1993 is aangegeven welke stappen dienen genomen te worden indien de laagdikte, de verdichtingsgraad en de waterdoorlatendheid van de aangebrachte afdichting niet voldoen aan de gestelde eisen.

Meestal gaat het om het vervangen van het niet aan de eisen voldane materiaal door nieuw materiaal.

5. EVALUATIE VAN BESTAANDE BUITENLANDSE RICHTLIJNEN EN/OF PROTOCOLLEN

In het kader van het literatuuronderzoek werd nagegaan of er in het buitenland richtlijnen en/of protocollen beschikbaar zijn voor het gebruik van natuurlijke klei en zand-bentoniet als afdichtingsmateriaal.

5.1. Nederland

In Nederland werden in het kader van de voorschriften van het "Stortbesluit Bodembescherming" van 1 maart 1993 een aantal richtlijnen uitgewerkt met betrekking tot minerale afdichtingslagen. Deze richtlijnen zijn :

- Richtlijn voor dichte eindafwerking op afval- en reststofbergingen (Publicatiereeks bodembescherming nr. 1991/2) ;
- Richtlijn onderafdichtingsconstructies voor stort- en opslagplaatsen (Ministerie van VROM, Heidemij Advies BV, maart 1993).

Op basis van vermelde richtlijnen werd, voor wat betreft zandbentoniet afdichtingen, door het Civieltechnisch Centrum Uitvoering Research en Regelgeving (CUR) een rapport opgesteld : "Aanbeveling 33 - Granulaire afdichtingslagen op basis van zandbentoniet". Deze CUR-Aanbeveling geeft definities, eisen en richtlijnen voor de vervaardiging en kwaliteitscontrole van granulaire afdichtingslagen op basis van zandbentoniet.

In het CUR-rapport 94-1 wordt meer informatie verstrekt over de achtergronden van het tot standkomen van de CUR-Aanbeveling 33.

Voor wat betreft natuurlijke kleien als afdichting werd door het Adviesbureau Brouwers b.v. uit Roermond in opdracht van het bedrijf Sanders en Geraedts BV uit Swalmen in 1987 een "Keuringsprotocol voor kleiafdichtingen onder afvalstortplaatsen" opgesteld. Door nieuwe ontwikkelingen en de ervaringen opgedaan bij de aanleg van klei-afdichtingen werd dit protocol in 1992 gewijzigd en tevens aangevuld met eisen voor bovenafdichtingen uit klei. Hierbij werd tevens rekening gehouden met de hogervermelde VROM-richtlijnen voor minerale afdichtingslagen.

Dit keuringsprotocol heeft echter alleen betrekking op het vooronderzoek, aanleg en nacontrole van een klei-onder- en bovenafdichting opgebouwd uit de tertiaire Tegelse en Brunssumse klei.

5.2. Duitsland

Door het Landesamt für Wasser und Abfall van de deelstaat Nordrhein-Westfalen werd in januari 1991 een richtlijnenontwerp voor minerale stortplaatsafdichtingen gepubliceerd. Dit richtlijnenontwerp is vrij volledig wat betreft de verschillende factoren die een afdichting beïnvloeden.

Wat ontbreekt zijn een duidelijke handleiding en werkvoorschriften om te komen tot een aanvaardbare afdichting. Wel worden voor de meeste kwaliteitseisen de DIN normen voor de uit te voeren proeven opgegeven.

5.3. Verenigd Koninkrijk

Door de North West Waste Disposal Officers Landfill Liners Sub-group werden in oktober 1988 richtlijnen gepubliceerd in verband met stortplaatsafdichtingen.

Deze richtlijnen zijn echter vrij summier en te algemeen om als een handleiding te kunnen worden gebruikt. Ook ontbreekt een procedure om een afdichting te controleren op zijn deugdelijkheid.

5.4. Besluit

Uit de beschikbare richtlijnen en protocollen blijkt dat de Nederlands CUR-Aanbeveling voor zandbentonietafdichtingen en het Nederlandse keuringsprotocol voor klei-afdichtingen het meest gedetailleerd en voldoende praktisch onderbouwd zijn om als leidraad te dienen voor het opstellen van een protocol geldig en toepasbaar in Vlaanderen.

Gezien de snelle evolutie en de actualiteit van de stortplaatsenproblematiek is het van belang de toestand op gebied van buitenlandse protocollen te blijven volgen.

6. SYNTHESE EN EVALUATIE

De uitgevoerde literatuurstudie toont aan dat er over het gebruik van minerale afdichtingen (zowel klei als zandbentoniet) reeds veel onderzoek werd uitgevoerd zowel wat betreft de eigenschappen van de gebruikte grondstoffen als wat betreft de techniek van het aanleggen en testen van de afdichting. Vooral in Duitsland en in Nederland blijkt reeds heelwat ervaring te zijn opgedaan met het bestudeerde soort afdichtingen.

Het lijkt dan ook aangewezen de meest recente evolutie betreffende de aanleg van minerale afdichtingen in Nederland en in Duitsland van nabij te blijven volgen. Vooral het praktisch aspect van het voorbereiden en het aanleggen van een minerale afdichting dient nader bestudeerd te worden, liefst aan de hand van praktijkvoorbeelden (type machines, werkwijzen, eventuele problemen enz.).

Ook is het aangewezen om meer in detail na te gaan welke meet- en proefmethoden aangewend kunnen worden om te komen tot een snelle en efficiënte evaluatie van de gebruikte grondstoffen en van de aangelegde afdichting.

Voor wat betreft het gebruik van natuurlijke klei voor afdichtingen kunnen de grote lijnen van het ene beschikbare Nederlandse keuringsprotocol uit 1994 worden overgenomen. Het Vlaamse protocol zou dan volgende delen moeten bevatten :

- geologische karakterisering van de aangewende klei.
- vooronderzoek naar de geschiktheid van de gebruikte klei ; dit omvat de procedures van de monsternamen en laboratoriumonderzoek.
- uitvoering van de aanleg van een klei-afdichting ; dit omvat een zo gedetailleerd mogelijke beschrijving van de technieken en werkwijzen bij de voorbereiding en bij het definitief aanbrengen van de klei.
- nacontrole van de klei-afdichting ; dit omvat de procedures van monsternamen en laboratoriumonderzoek.

Vooraleer geschiktheidseisen voor de gebruikte klei op te stellen dienen de globale kenmerken van de in Vlaanderen voorkomende tertiaire (en eventuele kwartaire) kleien onderzocht te worden. Uit deze gegevens kan dan een eisenpakket worden samengesteld.

Als basis voor een Vlaams protocol voor zandbentonietafdichtingen kan de Nederlandse CUR-Aanbeveling 33 grotendeels worden overgenomen daar deze heel gedetailleerd en gefundeerd de stappen aangeeft om te komen tot een doeltreffende zandbentonietafdichting. Er dient echter ook rekening te worden gehouden met de aanbevelingen voor verder onderzoek die aangegeven zijn in het achtergrondrapport 94-1 bij de CUR-Aanbeveling. Dit onderzoek omvat :

- de invloed nagaan van het gehalte aan calciumcarbonaat en organisch materiaal van het granulair materiaal op de waterdoorlatendheid van het mengsel met bentoniet.
- het onderzoek naar een betrouwbare proef om het montmorillonietgehalte in bentoniet te bepalen.
- het onderzoek naar een methode om het vervormingsgedrag van zandbentoniet in relatie tot het bentonietgehalte te bepalen.
- het onderzoek naar de diverse mengprocessen.

- de ontwikkeling van snellere methoden om de waterdoorlatendheid te bepalen.
- het onderzoek naar de reproduceerbaarheid van een k-waarde bepaling.
- de invloed nagaan van het percolaat op zandbentoniet afdichtingen (= chemische resistentie van het zandbentonietmengsel).

Er dient ook nagegaan te worden welke soorten bentoniet (samen met hun kenmerken) op de markt in Vlaanderen beschikbaar zijn. De eisen waaraan de bentoniet moet voldoen kunnen dan op een realistische basis (dit is rekening houdende met de beschikbare kwaliteit) opgesteld worden.

Verder dient nader onderzocht te worden of eventueel bestaande Belgische (of Europese normen) kunnen gebruikt worden als norm voor de diverse proeven en procedures.

Daartoe kan bij het Belgisch Instituut voor Normalisatie, het Europese Comité voor Normalisatie en bij het Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, Departement Leefmilieu en Infrastructuur nagegaan worden welke normen er in aanmerking kunnen komen om opgenomen te worden in een protocol betreffende minerale afdichtingen.

REFERENTIES

- ADVIESBUREAU BROUWERS B.V. (1994) *Keuringsprotocol voor de aanleg van onder- en bovenafdichtingen van afval- en reststofbergen met tertiaire klei. Rapport DIV-268-076*, Roermond, 23 pp.
- AL-KHAFABI A.W. & ANDERSLAND O.B. (1992) *Geotechnical Engineering and Soil Testing*. Saunders College Publishing, Harcourt Brace Jovanovich College Publishers, Fort Worth, 695 pp.
- ANONIEM (1988) *Guidelines on the use of landfill liners*. North West Waste Disposal Officers, Landfill Liners Sub-Group, Lancashire, 48 pp.
- ANONIEM (1989) Waterdichte bovenafdichting afvalstort nodig. *PT Energiebeheer & Afvalbeheer*, 1989/4, 9.
- CIVIELTECHNISCH CENTRUM UITVOERING RESEARCH EN REGELGEVING (1993) *Aanbeveling 33 - Granulaire afdichtingslagen op basis van zandbentoniet*. CUR, Gouda, 44 pp.
- CIVIELTECHNISCH CENTRUM UITVOERING RESEARCH EN REGELGEVING (1994) *Rapport 94-1 - Granulaire afdichtingslagen op basis van zandbentoniet. Achtergrondrapport bij CUR-Aanbeveling 33*. CUR, Gouda, 60 pp.
- COLLINS H.J., SPILLMANN P. & HERMANSEN B. (1988) Ist eine Folie auf einer mineralischen Deponieabdichtung vertretbar ?. *Müll und Abfall*, 20, 362-364.
- COWLAND J.W. & LEUNG B.N. (1991) A field trial of a bentonite landfill liner. *Waste Management & Research*, 9, 277-291.
- DRESCHER J. (1988) Deponiedichtungen für Sonderabfalldeponien-Arbeitspapier. *Müll und Abfall*, 20, 281-295.
- FINSTERWALDER K. (1990) Mengsel combineert aantal isolerende eigenschappen. *Land + Water*, 1990 /1, 120-123.
- HANDZIK K.H. (1989) *Anforderungen an mineralische Deponieabdichtungen. Veranstaltungsunterlagen zur Veranstaltung Nr. F-40-411-048-9, Prüfmethode an mineralischen Deponieabdichtungen*. Haus der Technik E.V., Essen.
- HECKOTTER C. (1988) Prüfmethode an mineralischen Deponieabdichtungen. Chr. Heckötter berichtet über eine Veranstaltung des Hauses der Technik in Essen am 16.05.88. *Baustoff Recycling + Deponietechnik*, 1988/4, 28-29.
- HEINRICHSBAUER J. (1989) Abdichten von Deponien und Sicherung von Altlastenstandorten. *Wasser, Luft und Boden*, 1989/6, 54-56.
- HOEKS J. & AGELINK G.J. (1981) *Onderzoek naar mogelijkheden om de infiltratie van regenwater in een afvalstort te verminderen - deel 5*. Nota ICW, 39 pp.

HOEKS J., OOSTEROM H.P., BOELS D., BORSTEN J.F.M., STRIJBIS K. & TER HOEVEN W. (1990) *Richtlijnen voor ontwerp en konstruktie van eindafdekkingen van afval- en reststofberging*. Rapport 91, Staring Centrum, Wageningen.

HOFFMANN H. & STIEF K. (1991) Schadenanalyse von Deponiebasisabdichtungen mit mineralischen Dichtstoffen und Kunststoffdichtungsbahnen. *Müll und Abfall*, **23**, 404-408.

HOLZLOHNER U. (1988) Das Feuchteverhalten mineralischer Schichten in der Basisabdichtung von Deponien. *Müll und Abfall*, **20**, 295-302.

KNUPFER J. (1988) Qualitätssicherung mineralischer Deponie-Basisabdichtungen mit Isotopen-Sonden. *Baustoff Recycling + Deponietechnik, Sonderausgabe zur ENTSORGA '88*, 14-16.

KOMODROMOS A. & MATTIAT B. (1989) Einsatz von licht- und rasterelektronenmikroskopischen Untersuchungsmethoden bei der Eignungsprüfung von mineralischen Deponieabdichtungen. *Müll und Abfall*, **21**, 253-263.

KONING L.F., SMAN H.T. & DE BRUIJN P.J. (1993) Stortplaats eeuwigdurende bron van (na)zorg. *Land + Water*, **1993/7**, 66-69.

LAFFITE Ph. (1986) Recherche, conception et réalisation de tests de mesure de faibles perméabilités in situ. In : *Recherche sur les déchets toxiques et dangereux*, pp. 113-141, CEE.

LANDESAMT FÜR WASSER UND ABFALL NORDRHEIN-WESTFALEN (1991) *Mineralische Deponieabdichtungen, Entwurf einer Richtlinie*. Abfallwirtschaft NRW, Nr. 15, Düsseldorf, 56 pp.

LE ROUEIL S., LE BIHAN J.P. & BOUCHARD R. (1992) Remarks on the design of clay liners used in lagoons as hydraulic barriers. *Can. Geotech. J.*, **29**, 512-515.

MOLENAAR T. (1993a) Een vuilstort is niet zomaar waterdicht. *Land + Water*, **1993/5**, 75-77.

MOLENAAR T. (1993b) VBM legt folie aan de "afval-kant". *Land + Water*, **1993/7**, 70-71.

OWEIS I.S. & KHERA R.P. (1990) *Geotechnology of Waste Management*. Butterworth & Cie, London, 273 pp.

REUTER E. (1990) Bauausführung mineralischer Dichtungsschichten für Mülldeponien. *Baustoff Recycling + Deponietechnik*, **1990/2**, 23-26

SCHAFER J. (1990) Oberflächenabdichtungen von deponien-Dichtheid und ihre Einflußfaktoren. *Müll und Abfall*, **22**, 427-432.

STEFFEN H. (1990) Anforderungen an die Dichtungselemente von Kombinationsdichtungen für die Deponiebasis. *Müll und Abfall*, **22**, 638-649.

STICHTING C.R.O.W. (1990) *Standaard RAW bepalingen*.

TER HOEVEN W.F. (1991) Minerale laag met kunststoffolie pakt vuilstort goed in. *Land + Water*, **1991/6**, 94-97.